



**SKRIPSI – TK141581**

**TEKNOLOGI *CARBON CAPTURE AND STORAGE* (CCS)  
SYSTEM DENGAN MENGGUNAKAN METODE  
PERANCANGAN *PINCH***

**Oleh :  
TABRONI ALI BUSTOMI  
NRP. 2315 105 003**

**PRAYOGO KUNTORO  
NRP. 2315 105 004**

**Dosen Pembimbing :  
Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 1973 06 15 1999 03 1003**

**Prof. Ir. Renanto, M.S., Ph.D.  
NIP. 1953 07 19 1978 03 1001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



**SKRIPSI – TK141581**

**CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS) SYSTEM  
TECHNOLOGY USING PINCH METHOD**

**By :  
TABRONI ALI BUSTOMI  
NRP. 2315 105 003**

**PRAYOGO KUNTORO  
NRP. 2315 105 004**

**Advisor :  
Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 1973 06 15 1999 03 1003**

**Prof. Ir. Renanto, M.S., Ph.D.  
NIP. 1953 07 19 1978 03 1001**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

### TEKNOLOGI CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS) SYSTEM DENGAN MENGUNAKAN METODE PERANCANGAN PINCH

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Tabroni Ali Bustomi**  
**Prayogo Kuntoro**

**NRP. 2315 105 003**  
**NRP. 2315 105 004**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Juwari ST., M.Eng, Ph.D ..... (Pembimbing 1)
2. Prof. Ir. Renanto, M.S., Ph.D ..... (Pembimbing 2)
3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S ..... (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D ..... (Penguji II)
5. Dr. Ir. Susianto, DEA ..... (Penguji III)



## LEMBAR PERSETUJUAN

Laporan penelitian skripsi dengan judul:

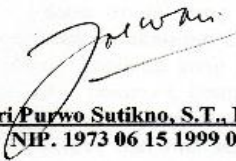
**"Teknologi *Carbon Capture and Storage (CCS)* System Dengan Menggunakan Metode Perancangan *Pinch*"**

Surabaya, 7 Juli 2017

Telah diperiksa dan disetujui untuk diujikan:

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

  
**Juwari Purwo Sutikno, S.T., M.Eng., Ph.D**  
**NIP. 1973 06 15 1999 03 1003**

  
**Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D.**  
**NIP. 1953 07 19 1978 03 1001**

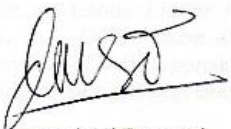
Mengetahui,

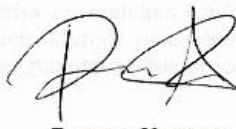
Kepala Laboratorium Perancangan dan Pengendalian Proses

Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS

  
**Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D.**  
**NIP. 1953 07 19 1978 03 1001**

Penyusun:

  
**Tabroni Ali Bustomi**  
**NRP. 2315 105 003**

  
**Pravogo Kuntoro**  
**NRP. 2315 105 004**



dilakukan dengan metode *pinch multi region* secara transfer massa secara simultan dan transfer massa secara *sequential* serta dilakukan optimisasi dengan variasi jeda waktu ( $\Delta t$ ) 0, 5, 10 berdasarkan TAC.

Hasil penelitian didapatkan pada metode *pinch* transfer massa secara *sequential* dihasilkan % *capturable* CO<sub>2</sub> paling banyak pada beda waktu 0 tahun sebesar 93,86 % daripada pengerjaan transfer massa secara simultan dengan % *capturable* CO<sub>2</sub> sebesar 83,94 %. Biaya paling efisien didapatkan pada metode *pinch* transfer massa secara simultan dengan jeda waktu ( $\Delta t$ ) 4,6 tahun dengan biaya Rp 2,15 Triliun daripada pengerjaan transfer massa secara *sequential* dengan ( $\Delta t$ ) 4,5 tahun dengan biaya Rp 2,25 Triliun. Metode *Linear Programming* GAMS bisa menentukan *utilitas storage* minimum pada CCS system akan tetapi kurang efisien. Metode *pinch* transfer massa secara *sequential* baik digunakan jika desain lebih mengutamakan kuantitas *capturable* CO<sub>2</sub> dibanding dengan segi biaya CCS.

***Kata kunci : CCS, pinch, cascade table, multi region, sink***

## ***Technology of Carbon Capture and Storage (CCS) System Using Pinch Design Method***

*Name of student* : 1. Tabroni Ali Bustomi      NRP. 2315 105 003  
2. Prayogo Kuntoro      NRP. 2315 105 004  
*Department* : *Chemical Engineering* FTI-ITS  
*Advisor* : 1. Juwari Purwo Sutikno ST., M.Eng, Ph.D.  
2. Prof. Ir. Renanto, M.S., Ph.D.

## ABSTRACT

*Global warming is a rise in global temperatures average on the earth's surface. Global warming is caused mainly by carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane. Solution that can be applied quickly and on a large scale is to use Carbon Capture and Storage (CCS) technology. This technology is a series of activities starting from CO<sub>2</sub> capture of the sources of CO<sub>2</sub> emissions (source), and then transport it to the storage of CO<sub>2</sub> in suitable geological sink locations (sink). In the CCS process, matching between sources and sinks often face many obstacles, such as capacity limits, location, injection flow rate, and availability time from sources and sinks that available.*

*These problems can be solved by a method, that is pinch method. A problem with CCS may occur when the source and sink located in one adjacent area (single region), so it is possible that the CCS process can occur in a multi region where the source and sink locations are far and with many regions. The development of multi region study was conducted in this study, with boundaries area of South Sumatra and East Java with a total of 5 sources and 6 sinks. The development was done by mass transfer simultaneously multi region pinch method and modified and optimized with time interval ( $\Delta t$ ) 0, 5, 10 based on TAC.*

*The result of this research is obtained by the pinch method of sequential mass transfer produced % capturable CO<sub>2</sub> at the most at time interval 0 years equal to 93,86 % than mass transfer*

*simultaneously method with % capturable CO<sub>2</sub> 83,94 %. The most efficient cost is found in mass transfer simultaneously pinch method with time interval ( $\Delta t$ ) of 4.6 years at a cost of Rp 2.15 trillion than sequencial mass transfer method with time interval ( $\Delta t$ ) of 4.5 years at a cost Rp 2.25 trillion. The Linear Programming GAMS method can determine the minimum storage utility in the CCS system but it is less efficient. The pinch sequencial mass transfer method is best used if the design prefers the quantity of capturable CO<sub>2</sub> compared to the cost side of CCS.*

***Keywords: CCS, pinch, cascade table, multi region, sink***



## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penyusun panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkat, rahmat serta hidayah-Nya kepada penyusun sehingga penyusun mampu menyelesaikan Proposal Skripsi yang berjudul **“Teknologi Carbon Capture and Storage (CCS) System Dengan Menggunakan Metode Perancangan Pinch”** serta mampu menyelesaikan proposal ini sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Dalam penyusunan proposal ini, penulis banyak mendapatkan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung dari beberapa pihak, Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang tua serta saudara – saudara kami, untuk doa, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.
2. Bapak Juwari Purwo Sutikno, S.T., M.Eng., Ph.D, selaku Kepala Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya dan Dosen Pembimbing I, atas bimbingan dan saran yang diberikan.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Renanto, MS., Ph.D, selaku Kepala Laboratorium Perancangan dan Pengendalian Proses dan Dosen Pembimbing II, atas bimbingan dan saran yang diberikan.
4. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Kimia FTI – ITS yang telah memberikan ilmunya kepada penulis serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia.
5. Semua teman-teman seperjuangan *Perdalpro Crew*, kakak-kakak S2 dan S3, serta LJ Gasal 2015 yang telah menemani selama suka duka pembuatan tugas akhir ini.

Penyusun menyadari bahwa laporan ini masih berada jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penyusun mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat konstruktif dari semua pihak bagi kesempurnaan laporan ini. Penyusun berharap pula laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan bagi penyusun pada khususnya. Terima kasih.

Surabaya, 3 Juli 2017

Penyusun

# DAFTAR ISI

Lembar Persetujuan	
Lembar Pengesahan	
Abstrak .....	i
<i>Abstract</i> .....	iii
Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vii
Daftar Gambar .....	ix
Daftar Tabel.....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah .....	I-4
1.3 Batasan Masalah .....	I-4
1.4 Tujuan Penelitian.....	I-4
1.5 Manfaat Penelitian .....	I-4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Deskripsi <i>Carbon Capture and storage</i> (CCS) .....	II-1
2.2 Teknologi <i>Pinch</i> .....	II-5
2.3 <i>Cost Optimization</i> dalam <i>Heat Exchanger</i> .....	II-7
2.4 Studi Hasil Penelitian Sebelumnya.....	II-8
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Tahapan Penelitian .....	III-1
3.2 Pengumpulan Data dan Studi Literatur .....	III-2
3.3 Penentuan dan Pengolahan Data.....	III-5
3.4 Pembuatan <i>Cascade Table</i> .....	III-7
3.5 Menentukan Minimum <i>Utility Storage</i> dengan Metode <i>Linear Programming</i> .....	III-8
3.6 Pembuatan Diagram Grid .....	III-9
3.7 Optimisasi Berdasarkan <i>Total Annualized Cost</i> .....	III-13
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Pendekatan Target Jaringan Perpindahan Massa CCS <i>Multi Region</i> .....	IV-1
4.1.1 <i>Table Cascade CCS System</i> .....	IV-2

4.1.2 Menghitung Minimum <i>Utility Storage</i> dengan Metode <i>Linear Programming</i> .....	IV-3
4.1.3 Diagram Grid CCS System .....	IV-6
4.2 Pendekatan Target CCS <i>Multi Region</i> dengan Transfer Massa Secara <i>Sequential</i> .....	IV-7
4.3 Optimisasi Target CCS System dengan Metode <i>Total Annualized Cost</i> .....	IV-13
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	V-1
5.2 Saran .....	V-1
DAFTAR PUSTAKA.....	xi
DAFTAR NOTASI .....	xiv
APENDIKS .....	App-1
LAMPIRAN .....	xv
BIODATA PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Emisi CO <sub>2</sub> Tahunan di Indonesia .....	I-1
Gambar 1.2	Lokasi <i>Sink</i> yang tersedia di Indonesia .....	I-2
Gambar 2.1	Ilustrasi Sistem CCS .....	II-1
Gambar 2.2	Proses dan Sistem CO <sub>2</sub> <i>Capture</i> .....	II-4
Gambar 2.3	Kurva Komposit dalam Teknologi <i>Pinch</i> .....	II-6
Gambar 2.4	Penentuan Biaya Optimum Pada Penukar Massa .....	II-8
Gambar 3.1	Diagram Alir Metode Penelitian .....	III-1
Gambar 3.2	Contoh Proses Pembuatan <i>Cascade Table</i> .....	III-8
Gambar 3.3	Contoh Proses Pembuatan <i>Shifted Cascade</i> <i>Table</i> $\Delta t$ 5 .....	III-8
Gambar 3.4	Contoh Penerapan Langkah 1 dan 2 .....	III-10
Gambar 3.5	Contoh Penerapan Langkah 3, <i>Shifted</i> Tahun $\Delta t$ 5 .....	III-10
Gambar 3.6	Contoh Penerapan Langkah 4 s/d 5 dan Proses <i>Split</i> .....	III-12
Gambar 3.7	Contoh Penerapan Langkah 6 .....	III-12
Gambar 3.8	Contoh Penerapan Langkah Diagram Grid <i>Sequencial</i> .....	III-13
Gambar 4.1	Diagram Grid CCS dengan Delta Waktu <i>Pinch</i> 0 Tahun .....	IV-6
Gambar 4.2	Hasil Diagram Grid <i>Single Region</i> $\Delta t$ 0 .....	IV-8
Gambar 4.3	Hasil Diagram Grid Transfer Massa Secara <i>Sequencial</i> $\Delta t$ 0 .....	IV-11
Gambar 4.4	Grafik Hasil Perhitungan TAC Transfer Massa Secara Simultan.....	IV-16
Gambar 4.5	Grafik Hasil Perhitungan TAC Transfer Massa Secara <i>Sequencial</i> .....	IV-17

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Waktu Mulai ( <i>Start Source</i> dan <i>Sink</i> .....	III-3
Tabel 3.2	Data Umur Operasi ( <i>Plant Life</i> ) <i>Source</i> dan <i>Sink</i> .....	III-3
Tabel 3.3	Data Laju Aliran, Total $\text{CO}_2$ <i>Load</i> dan Total $\text{CO}_2$ <i>Capacity Source</i> dan <i>Sink</i> .....	III-4
Tabel 3.4	Data <i>Source</i> ( $\text{CO}_2$ <i>Capture Load</i> ) Studi Kasus Sumatera Selatan .....	III-5
Tabel 3.5	Data <i>Sink</i> Studi Kasus Sumatera Selatan .....	III-6
Tabel 3.6	Data <i>Sink</i> Studi Kasus Jawa Timur .....	III-6
Tabel 3.7	Rangkuman Data <i>Source</i> dan <i>Sink</i> .....	III-6
Tabel 4.1	Karakteristik <i>Source</i> dan <i>Sink</i> .....	IV-1
Tabel 4.2	Tabel <i>Cascade CCS</i> dengan Delta Waktu <i>Pinch</i> 0 Tahun .....	IV-3
Tabel 4.3	Tabel <i>Cascade CCS Single Region</i> $\Delta t$ 0.....	IV-9
Tabel 4.4	Rangkuman Hasil Desain Transfer Massa CCS Secara Simultan .....	IV-12
Tabel 4.5	Rangkuman Hasil Desain Transfer Massa CCS Secara <i>Sequencial</i> .....	IV-12
Tabel 4.6	Hasil Perhitungan TAC Transfer Massa Secara Simultan.....	IV-14
Tabel 4.7	Hasil Perhitungan TAC Transfer Massa Secara <i>Sequencial</i> .....	IV-14

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemanasan global merupakan kenaikan suhu udara rata-rata global pada permukaan bumi. Pemanasan global itu disebabkan terutama karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan metana. Suhu global selama periode Januari hingga September 2016 sudah sekitar  $0,88^\circ\text{C}$  ( $1,58^\circ\text{F}$ ) di atas rata-rata suhu global ( $14^\circ\text{C}$ ) dengan referensi periode pada tahun 1961-1990 (WMO, 2016). Selain itu, Konferensi di Paris, Perancis *Climate Change* pada tahun 2017 lalu menandai bahwa perubahan iklim bukanlah isapan jempol belaka dan pihak dunia mulai menyadari perlunya penanganan serius.

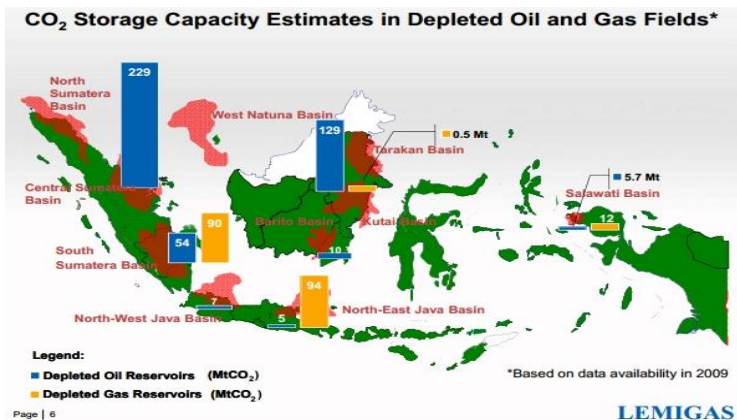


Gambar 1.1 Emisi  $\text{CO}_2$  Tahunan di Indonesia (LEMIGAS, 2009)

Gambar 1.2 menampilkan emisi  $\text{CO}_2$  pada Tahun 2009, pada gambar ini terlihat bahwa emisi  $\text{CO}_2$  terbesar adalah berada di Pulau Jawa dan Sumatera. Pulau Jawa menghasilkan emisi  $\text{CO}_2$  sebesar 60 juta ton per tahun, Sumatera 25 juta ton per tahun, Kalimantan 5 juta ton per tahun, dan Sulawesi 5 juta ton per tahun.

Solusi yang dapat diterapkan secara cepat dan dalam skala besar adalah menggunakan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS). Teknologi ini merupakan kegiatan yang meliputi mereduksi emisi dari industri seperti fasilitas pengolahan gas alam dan pembangkit listrik (*source*) dengan cara menangkap CO<sub>2</sub> (*capture*) dari sumber-sumber emisi CO<sub>2</sub>, kemudian mentransportasikannya ke lokasi penyimpanan CO<sub>2</sub> di *geological storage* yang sesuai (*sink*) seperti sumur minyak yang telah kosong dan/ atau reservoir gas, lapisan *saline aquifers*, lapisan batubara, dan formasi batuan lain yang sejenis. Menurut Kementerian ESDM, CCS merupakan salah satu teknologi mitigasi perubahan iklim yang berpotensi mengurangi emisi CO<sub>2</sub> skala besar hasil dari pembakaran bahan bakar fosil.

Dalam prakteknya, terdapat kemungkinan bahwa *sink* belum siap digunakan pada saat atau sebelum *source* dioperasikan, sehingga hal itu menjadi kendala perencanaan. Dengan kata lain, perencanaan merupakan proses pencocokkan (*matching*) antara *source* dan *sink*. Parameter pencocokkan tersebut seperti batas kapasitas, lokasi, laju alir injeksi, dan waktu ketersediaan dari *source* dan *sink* yang tersedia.



Gambar 1.2 Lokasi *Sink* yang tersedia di Indonesia (Iskandar, 2009)



Berdasarkan Gambar 1.2, di Indonesia diperkirakan terdapat beberapa *sink* yang tersedia, diantaranya bekas pengeboran minyak dan gas. *Sink* terbesar berada di pulau Sumatera dan pulau Kalimantan, pulau Sumatera diperkirakan memiliki *storage* sebesar 373 juta ton, pulau Jawa sebesar 105 juta ton, pulau Kalimantan sebesar 129,5 ton, dan pulau Papua sebesar 17,7 juta ton. Metode *pinch* bisa diaplikasikan pada proses integrasi panas ataupun massa. Proses integrasi ini sudah pernah dilakukan dan membuktikan bahwa metode *pinch* bisa menangani masalah perencanaan CCS (Ooi dkk, 2012).

Lokasi *source* dan *sink* yang ada belum tentu berada pada satu wilayah yang berdekatan dan belum tentu kapasitas *sink* yang tersedia di suatu wilayah tertentu cukup untuk menyimpan CO<sub>2</sub> yang diemisikan oleh wilayah tersebut. Sehingga dimungkinkan bahwa proses CCS dapat terjadi secara *multi region* dimana lokasi *source* dan *sink* berjauhan dan dengan banyak wilayah. Selain itu, jeda waktu ( $\Delta t$ ) harus diperhitungkan karena kemungkinan terdapat variasi jeda waktu yang bisa terjadi pada prosesnya.

Proses perpindahan massa CO<sub>2</sub> selain dilakukan secara simultan juga bisa dilakukan dengan cara *sequencial*. Perpindahan dengan cara ini dinilai bisa meningkatkan persentase penangkapan CO<sub>2</sub> (Diamante et al, 2014). Pada penelitian terdahulu perpindahan massa secara *sequencial* pada wilayah *multi region* belum pernah dilakukan padahal cara ini bisa mengatasi masalah pencocokan (*matching*) jaringan pada sistem CCS.

Oleh karena itu, perlu adanya studi penelitian tentang CCS *system* pada wilayah *multi region* serta dilakukan transfer *sequencial* yang belum pernah dilakukan sebelumnya dan juga dilakukan optimisasi biaya pada variasi jeda waktu ( $\Delta t$ ) yang berbeda-beda sehingga dapat diperoleh jaringan perpindahan massa CCS yang terbaik dan efisien.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah mengembangkan jaringan perpindahan massa pada teknologi CCS *multi region* dengan menggunakan metode *pinch* pada wilayah *multi region* dengan variasi konfigurasi grid dan jeda waktu ( $\Delta t$ ) serta mengoptimisasi biayanya dengan *Total Annualized Cost* (TAC).

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Metode yang digunakan adalah metode *pinch* dan analisa ekonomi dengan *Total Annualized Cost*.
2. Wilayah yang ditinjau adalah *source* Sumatra Selatan dan *sink* Sumatra Selatan + Jawa Timur.
3. Software yang digunakan adalah GAMS.IDE. dan Matlab R2015b.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan teknologi CCS dengan metode *pinch* pada wilayah *multi region* pada  $\Delta t$  (jeda waktu) yang berbeda-beda.
2. Membandingkan desain jaringan perpindahan massa dengan metode *pinch* secara simultan dan *sequencial*.
3. Optimisasi biaya teknologi CCS dengan *Total Annualized Cost* dan *Software* Matlab.

## 1.5 Manfaat Penelitian

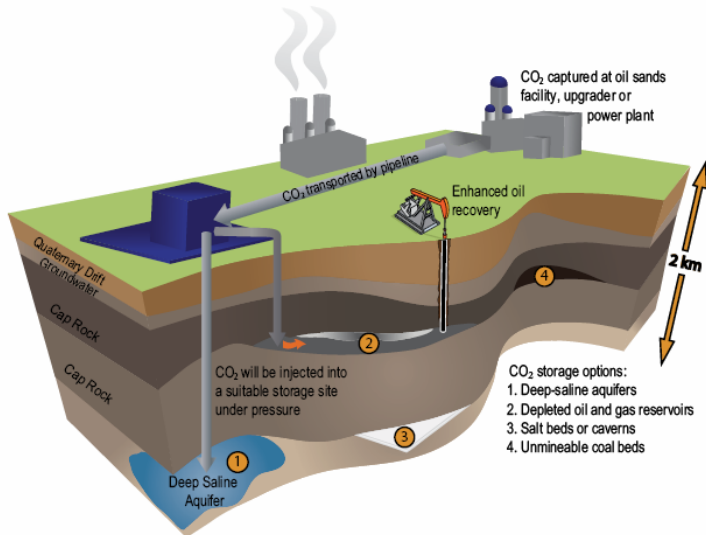
Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah memberikan solusi masalah perencanaan teknologi CCS pada wilayah *multi region* dan mengembangkannya agar lebih aplikatif digunakan dengan menggunakan metode *pinch* dan optimisasi biaya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Deskripsi *Carbon Capture and Storage (CCS)*

*Carbon capture storage*, yang mana sering disebut sebagai *carbon capture and sequestration*, mencegah CO<sub>2</sub> dalam jumlah banyak terlepas ke dalam atmosfer. Teknologi ini mencakup penangkapan CO<sub>2</sub> yang diproduksi oleh pabrik industri yang besar, mengkompresinya untuk transportasi dan kemudian memasukkannya ke dalam formasi batuan yang sangat dalam dengan hati-hati, dimana itu adalah penyimpanan permanen (Global CCS Institute, 2011).



Gambar 2.1 Ilustrasi sistem CCS

Pertama, CO<sub>2</sub> akan dihilangkan, atau dipisahkan, dari pabrik batubara dan pembangkit listrik, dan dari pembuatan baja dan semen. Ada tiga jenis *capture*; pascapembakaran, prapembakaran

dan pembakaran *oxyfuel*. Cara ini disebut *CO<sub>2</sub> capture* dan dapat menangkap 90% dari emisi *CO<sub>2</sub>*.

*CO<sub>2</sub>* kemudian dikompresi dan diangkut ke sebuah lapangan penyimpanan yang sesuai. Transportasi umumnya dilakukan di pipa. Transportasi kapal juga merupakan pilihan untuk transportasi *CO<sub>2</sub>* lepas pantai.

*CO<sub>2</sub>* yang disuntikkan ke dalam lapangan penyimpanan yang sesuai jauh di bawah tanah. Lapangan penyimpanan harus formasi geologi yang menjamin penyimpanan yang aman dan permanen. Penyimpanan dapat mengambil tempat di bekas ladang minyak & gas (*depleted*), atau formasi garam dalam (*deep saline*) (*CCSassociation.org*).

CCS melibatkan penangkapan *CO<sub>2</sub>* dari emisi industri (bahan bakar fosil pembangkit listrik) untuk menghasilkan aliran *CO<sub>2</sub>* yang relatif murni melalui berbagai teknik, seperti:

a. *Pre-combustion*

Sistem *Pre-combustion* adalah proses penangkapan *CO<sub>2</sub>* dari bahan bakar fosil yang terjadi sebelum proses pembakaran. Sistem *Pre-combustion* ini memproses bahan bakar utama dengan uap dan udara ataupun dengan oksigen dalam reaktor untuk menghasilkan campuran yang terdiri dari karbon monoksida (*CO*) dan *H<sub>2</sub>* (gas sintesis - '*syngas*') sebagai komponen utamanya. *H<sub>2</sub>* tambahan, bersama-sama dengan *CO<sub>2</sub>*, diproduksi oleh reaksi *CO* dengan uap dalam reaktor kedua (*shift Reactor*). Campuran yang dihasilkan dari *H<sub>2</sub>* dan *CO<sub>2</sub>* kemudian dapat dipisahkan ke dalam aliran gas *CO<sub>2</sub>* dan aliran hidrogen. Jika yang disimpan adalah *CO<sub>2</sub>*, maka hidrogen akan membawa energi bebas karbon yang dapat dibakar untuk menghasilkan listrik atau panas. Meskipun langkah awal dari konversi bahan bakar ini lebih rumit dan lebih mahal jika dibandingkan dengan sistem *Post-combustion*, namun tekanan dan konsentrasi *CO<sub>2</sub>* yang dihasilkan oleh *shift Reactor* lebih tinggi (biasanya 15-60% volume dari basis kering) sehingga hal ini dapat lebih menguntungkan dalam pemisahan *CO<sub>2</sub>*. Sistem ini juga dapat digunakan pada pembangkit listrik yang

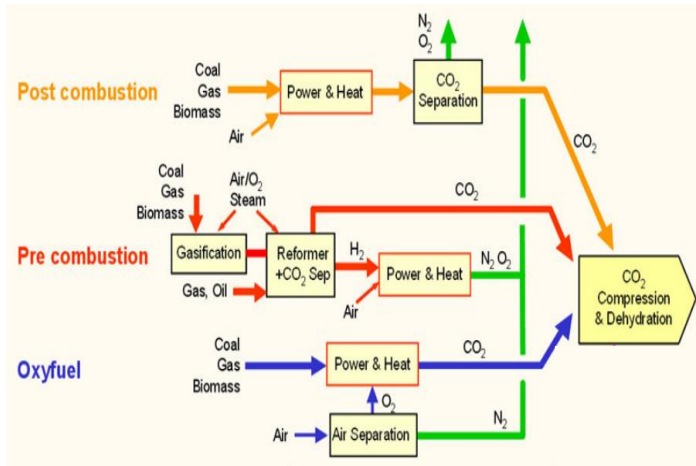
menggunakan teknologi *Integrated Gasification Combined Cycle* (IGCC) (IEA, 2013, IPCC, 2005).

b. *Post-combustion*

Sistem *Post-combustion* adalah memisahkan CO<sub>2</sub> dari gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar utama di udara. Sistem ini biasanya menggunakan pelarut cair untuk menangkap sebagian kecil dari CO<sub>2</sub> (biasanya 3-15% volume) yang ada dalam aliran gas buang di mana konstituen utamanya adalah nitrogen (dari udara). Untuk *Pulvuraised Coal* (PC) dalam pembangkit listrik atau gas alam biasanya menggunakan pelarut organik seperti Mono-Etanolamin (MEA) (IEA, 2013, IPCC, 2005).

c. *Oxyfuel combustion*

Pada sistem ini menggunakan oksigen murni untuk menghasilkan gas buang yang berupa uap air dan CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi daripada uap airnya (lebih dari 80% volume). Dalam sistem ini uap air hasil dari gas buang, kemudian dihilangkan dengan cara mendinginkan dan mengompresi aliran gas. *Oxyfuel combustion* memerlukan pemisahan oksigen dari udara dengan kemurnian 95-99% sedangkan untuk menghilangkan polutan udara dan gas non-terkondensasi (seperti nitrogen) dari gas buang CO<sub>2</sub>, diperlukan penanganan lebih lanjut sebelum dikirim ke penyimpanan (IEA, 2013, IPCC, 2005). Secara teori, teknologi ini lebih sederhana dan lebih murah daripada proses absorpsi, namun salah satu kelemahannya adalah untuk dapat menghasilkan aliran oksigen murni dibutuhkan biaya yang lebih tinggi.



Gambar 2.2 Proses dan Sistem CO<sub>2</sub> Capture

CO<sub>2</sub> akan diangkut terutama di pipa dalam bentuk cair. Hal ini membuat transportasi yang lebih efisien dan membutuhkan pipa yang lebih kecil daripada jika diangkut sebagai gas. Di Inggris, CO<sub>2</sub> akan diangkut melalui jaringan pipa yang dibangun (baik *on* dan *offshore*) atau bekas jaringan pipa gas alam, untuk penyimpanan yang aman jauh di bawah dasar laut. Sesuai dengan Bagian 2 dari Peraturan Pipa Keselamatan 1996, desain, pemeliharaan dan operasi akan standar keamanan yang ketat dan sebagian besar jaringan pipa akan diletakkan lepas pantai, kegiatan di mana Inggris memiliki tingkat keahlian yang tinggi. Meskipun pipa adalah pilihan yang paling mungkin untuk skala besar transportasi CO<sub>2</sub>, perkapalan dan transportasi darat juga memungkinkan.

Setelah melewati proses penangkapan CO<sub>2</sub>, kemudian CO<sub>2</sub> dapat disimpan dalam reservoir geologi yang sesuai, seperti *saline aquifers*, *reservoir* gas dan minyak bumi, dan lapisan batubara yang tidak dapat diakses (Davison dkk, 2001). CO<sub>2</sub> ini juga dapat digunakan dalam aplikasi lain, seperti *Enhanced Oil Recovery* (EOR) dan *Coal Bed Methane* (ECBM) yang juga dapat berfungsi untuk mengimbangi beberapa biaya CCS dengan menghasilkan

pendapatan tambahan dari produksi bahan bakar (Global CCS Institute, 2011).

Perencanaan sistem CCS telah terjadi selama beberapa dekade ini karena berbagai alasan, seperti kebutuhan untuk evaluasi dari *geological sink*, pengenalan tentang sumber karbon baru, dan *geological sink* yang hanya akan tersedia di kemudian hari. Hal ini menyebabkan *source* dan *sink* yang hanya tersedia pada waktu yang berbeda, sehingga menimbulkan pendekatan multi periode yang serupa dengan Ooi, dkk (2012). Metode ini meliputi kapasitas dan injektivitas pada *geological sink* yang dapat digunakan untuk menentukan manakah *source* – *sink* yang cocok untuk menyimpan CO<sub>2</sub> yang paling optimal.

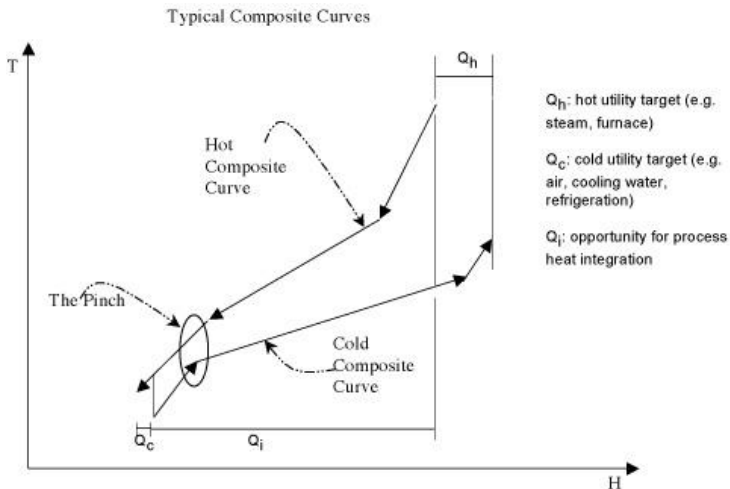
## 2.2 Teknologi *Pinch*

Teknologi *pinch* dibangun atas dasar hukum-hukum termodinamika perpindahan panas. Teknologi ini didominasi oleh metode perancangan jaringan penukar panas (*Heat Exchanger Network* atau HEN) yang memberikan penghematan biaya energi optimum. Kemudahan dan unjuk kerjanya yang baik membuat teknologi ini banyak digunakan sebagai metode standar dalam melakukan perancangan dan analisa sistem proses.

Istilah “Teknologi *Pinch*” telah diperkenalkan oleh Linnhoff dan Hindmarch (1983) untuk menghadirkan suatu metode termodinamika didasarkan yang dapat menjamin energi minimum dalam perancangan rangkaian *Heat Exchanger*. Akhir-akhir ini telah muncul sebagai suatu pengembangan luar biasa di suatu proses desain dan konservasi energi. Teknologi *pinch* sering digunakan untuk menghadirkan aplikasi dan algoritma untuk belajar proses industri. Teknologi *pinch* memperkenalkan suatu metode sederhana untuk analisis sistematis dalam suatu proses kimia dan suatu sistem utilitas.

Dengan menggunakan metode *pinch* dapat ditunjukkan mana arus panas yang perlu didinginkan dan arus dingin yang perlu dipanaskan seperti yang dilustrasikan pada Gambar 2.3. Dalam metode *pinch* terdapat nilai suhu yang disebut *pinch point* yang

merupakan titik optimum pada desain proses, dimana arus dengan nilai suhu yang berada di atas *pinch point* merupakan sumber panas, sementara yang berada di bawah *pinch point* merupakan arus yang membutuhkan panas. Arus yang merupakan sumber panas bisa dipakai untuk memanaskan arus dingin dan sebaliknya arus dingin bisa dipakai untuk mendinginkan arus panas dengan memasang *heat exchanger* pada kedua arus tersebut. Dengan metode *pinch* bisa ditentukan arus mana saja yang bisa dihubungkan dengan *heat exchanger* dan seberapa banyak transfer panas yang terjadi pada *heat exchanger* tersebut untuk mendapatkan jaringan *heat exchanger* yang paling optimum untuk memanfaatkan panas dari arus-arus tersebut.



Gambar 2.3 Kurva Komposit dalam Teknologi *Pinch*

Salah satu dari beberapa keuntungan dari teknologi *pinch* dibandingkan dari metode desain transfer simultan adalah kemampuan untuk mengatur energi dan target biaya untuk proses individual. Oleh karena itu untuk membantu mengidentifikasi semua proyek untuk penghematan energi dan kebutuhan investasi.



*Heat integration* merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi konsumsi energi yang saat ini semakin meningkat. Pada *heat integration*, energi yang tidak terpakai pada suatu sistem dimanfaatkan untuk sistem yang lain. Salah satu contoh adalah dengan menggunakan panas dari arus steam bersuhu tinggi untuk memanaskan cairan yang suhunya lebih rendah.

Dalam konsep CCS titik pinch merupakan waktu dimana tidak ada perpindahan massa. Transfer massa terjadi pada waktu sebelum dan/atau sesudah waktu pinch tersebut. Sehingga aliran perpindahan massa tidak boleh melewati waktu pinch itu.

### **2.3 Cost Optimization dalam Heat Exchanger**

Dalam menilai ekonomi penukar panas, dua jenis biaya harus dipertimbangkan adalah *capital* dan *operating*. *Capital* (investasi) mengacu dengan biaya penukar panas, penambahan perangkat, instalasi, isolasi, instrumentasi, pekerjaan listrik, pipa, pekerjaan rekayasa, dan konstruksi. *Capital Investment* dicirikan oleh kenyataan bahwa hal tersebut harus diganti setelah beberapa tahun sering pelayanan atau masa manfaat periode karena keausan atau menjadi usang dan tidak efisien. Oleh karena itu, hal ini berguna untuk mengevaluasi biaya tahunan terkait dengan investasi modal dari penukar panas yang disebut sebagai *Annual Capital Cost* (ACC).

*Annual Capital Cost* (ACC) dapat diperoleh dengan :

$$ACC = \text{capital cost} \times \frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n - 1}$$

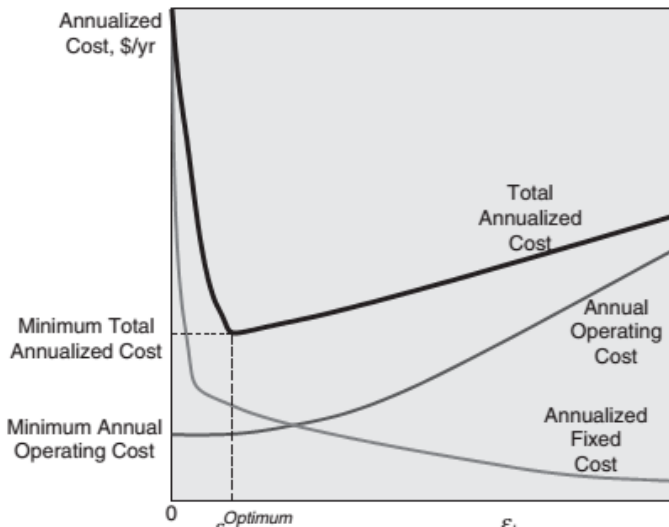
$i = \text{interest, kredit pinjaman modal}$   
 $n = \text{Waktu operasi (tahun)}$

(Smith, 2005)

Selain memerlukan ACC terdapat pengeluaran yang terus menerus yang disebut sebagai *Annual Operating Cost* (AOC) yang diperlukan untuk mengoperasikan jaringan penukar panas. Biaya operasi meliputi utilitas dan sebagainya. Dengan

menggabungkan ACC dan AOC, dapat diperoleh *Total Annualized Cost* (TAC) dari sistem pertukaran panas:

$$\text{Total annualized cost} = \text{Annualized fixed cost} + \text{Annual operating cost}$$



Gambar 2.4 Penentuan Biaya Optimum Pada Penukar Massa

## 2.4 Studi Hasil Penelitian Sebelumnya

Adapun penelitian tentang optimisasi CCS dan penggunaan metode *pinch integration* sudah pernah dilakukan. Berikut adalah deskripsi singkat mengenai penelitian terdahulu :

1. *Unified Pinch Approach for Targeting of Carbon Capture and Storage (CCS) Systems with Multiple Time Periods and Regions*. Diamante JAR, dkk (2014). Pada penelitian ini telah menggunakan metode *composite curve*, *table cascade*, dan diagram grid secara transfer *sequential* untuk mendesain jaringan CCS dengan wilayah *multi region*. Tetapi, pada penelitian ini belum dilakukan perbandingan metode diagram grid yang transfer *sequential* dengan diagram grid secara transfer simultan. Selain itu, belum dilakukan optimisasi dari

hasil jaringan CCS dengan jeda waktu ( $\Delta t$ ) dari segi biaya berdasarkan *Total Annualized Cost* (TAC).

2. Optimisasi jaringan *carbon capture and storage* (CCS) system dengan menggunakan metode *pinch*. Zuchrillah dan Rachmawati (2014). Pada penelitian ini metode perancangan *pinch* digunakan untuk jaringan perpindahan massa, *Mass Exchanger Network* (MEN). Sistem yang ditinjau adalah proses *Carbon Capture and Storage* (CCS) yang bertujuan untuk menangkap CO<sub>2</sub> dari sumber emisi CO<sub>2</sub> dan menyimpannya dalam bentuk yang lebih aman. Pada penelitian ini telah menggunakan diagram grid untuk mendesain jaringan CCS dan dilakukan pada wilayah *single region* serta dilakukan optimisasi jaringan tersebut.
3. *Planning of carbon capture and storage with pinch analysis techniques*. Ooi REH, dkk (2013). Pada penelitian ini penulis mengembangkan jaringan CCS dengan metode *pinch*. *Region* yang dipakai adalah *single region* (*source* dan *sink* berada dalam satu wilayah). Digunakan *Carbon storage composite curve* (CSCC) dan *carbon storage cascade analysis* (CSCA) untuk menentukan *matching* yang sesuai. Penelitian ini telah menggunakan metode *table cascade* untuk desain jaringan CCS, tetapi belum menggunakan diagram grid untuk mendesain jaringan CCS.
4. *Graphical targeting tool for the planning of carbon capture and storage*. Ooi REH, dkk (2012). Pada penelitian ini metode perancangan *pinch* dikembangkan untuk jaringan CCS hanya dengan metode *composite curve*. Pengembangan penelitian mendesain jaringan CCS dengan metode *table cascade* dan diagram grid belum dilakukan.

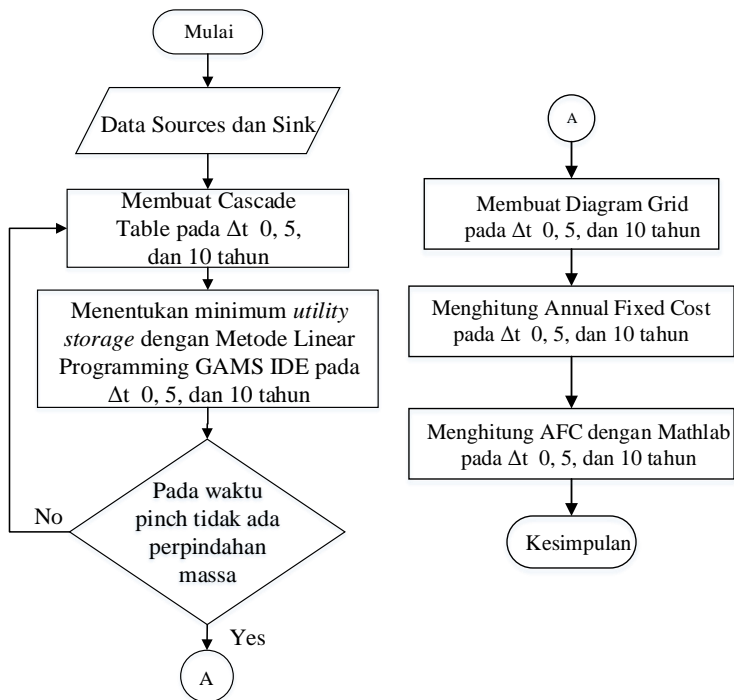
Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian

Pada bab ini berisi metodologi yang akan memandu pelaksanaan penelitian, digambarkan melalui proses pengambilan keputusan untuk mendapatkan model optimisasi pada jaringan *Carbon Capture and CCS* sistem. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan jaringan optimal yang dapat di gunakan untuk berbagai problem perencanaan CCS serta menghasilkan perpindahan massa (*load*) yang paling efisien. Tahapan penelitian ini yaitu :



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

### 3.2 Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Pengumpulan data sangat penting sehubungan dengan realitas data di lapangan, karena kecocokan pada hasil penelitian dipengaruhi oleh pengambilan data yang tepat. Hingga saat ini, di Indonesia masih belum menerapkan sistem CCS atau masih dalam bentuk riset dan kajian. Data yang diperlukan untuk penelitian ini antara lain *source* dan *sink* CO<sub>2</sub>, waktu mulai proses, umur operasi, kapasitas dan laju aliran dari *source* dan *sink*. Penelitian dilakukan dengan wilayah *multi regional*, sehingga data *source* dan *sink* perlu didapatkan dari banyak wilayah. Batasan wilayah yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu sebanyak 2 wilayah yaitu Sumatera Selatan dan Jawa Timur berdasarkan ketersediaan data dari studi literatur. *Source* didapatkan 5 industri di wilayah Sumatera Selatan (PLN Bukit Asam, RU III Plaju, PT Merbau GGS, PT Semen Batu Raja, Pusri Palembang) dan *Sink* didapatkan di wilayah Sumatera Selatan (Site I2, H2, 3) dan Jawa Timur (Banyu Urip, Sukowati, Mudi) (Usman 2014, Satyana dan Purwaningsih 2003).

Waktu mulai (*Start*) proses *source* merupakan waktu pertama industri melakukan proses penangkapan CO<sub>2</sub> dari emisinya. Sedangkan waktu mulai proses *sink* merupakan waktu pertama CO<sub>2</sub> disimpan dalam *sink site*. Waktu mulai proses *source* diasumsi berdasarkan pertimbangan bahwa setiap *source* tidak memungkinkan dilakukan penangkapan secara bersamaan karena membutuhkan waktu untuk perencanaan setiap *sourcenya*. Sehingga waktu mulai *source* diasumsi dengan waktu mulai berbeda-beda setiap *sourcenya*. Sedangkan waktu mulai proses *sink* didapatkan dari riset Lemigas oleh Usman pada tahun 2014 dan Satyana dkk pada tahun 2003 dimana waktu tersebut merupakan waktu *sink* sudah tidak dapat dilakukan penambangan.

Tabel 3.1. Data waktu mulai (*Start*) *source* dan *sink*

<i>Source site</i>	<i>Start</i>	<i>Sink site</i>	<i>Start</i>
PLN Bukit Asam	5	I2	7
RU III Plaju	7	H2	4
PT Merbau GGS	15	3	2
PT Semen Batu Raja	10	Banyu Urip	10
Pusri Palembang	12	Sukowati	20
		Mudi	30

Umur operasi (*Plant life*) merupakan waktu operasi masing-masing *source* dan *sink* melakukan proses CCS. Umur operasi dari *source* didapatkan dari riset Lemigas oleh Usman pada tahun 2014, sedangkan *sink* diasumsi berdasarkan pertimbangan bahwa pada setiap proses CCS tidak memungkinkan keseluruhan proses CCS dapat dilakukan dengan waktu operasi yang sama, sehingga umur operasi *sink* diasumsi dengan umur yang berbeda-beda pada setiap *sink*nya.

Tabel 3.2. Data umur operasi (*Plant life*) *source* dan *sink*

<i>Source site</i>	<i>Plant life</i> (y)	<i>Sink site</i>	<i>Plant life</i> (y)
PLN Bukit Asam	25	I2	25
RU III Plaju	25	H2	25
PT Merbau GGS	25	3	50
PT Semen Batu Raja	50	Banyu Urip	36
Pusri Palembang	20	Sukowati	50
		Mudi	55

Laju aliran CO<sub>2</sub> merupakan jumlah massa CO<sub>2</sub> yang dapat ditangkap (*average CO<sub>2</sub> captured rate*) dari emisi *source* atau

jumlah massa CO<sub>2</sub> yang dapat disimpan/ injeksi di dalam *sink* (*average CO<sub>2</sub> injection rate*) setiap tahunnya. Laju aliran berhubungan dengan beban total emisi CO<sub>2</sub> (*Total CO<sub>2</sub> load*) dari masing-masing *source* dan total kapasitas penyimpanan CO<sub>2</sub> (*Total CO<sub>2</sub> capacity*) dari masing-masing *sink*. Jika diketahui laju aliran, maka dapat diketahui *total CO<sub>2</sub> load* atau *total CO<sub>2</sub> capacity* dengan mengalikan umur operasi dengan laju aliran, begitu pula sebaliknya jika diketahui *total CO<sub>2</sub> load* atau *total CO<sub>2</sub> capacity* maka dapat diketahui laju aliran CO<sub>2</sub>. *average CO<sub>2</sub> captured rate* didapatkan dari riset Lemigas oleh Usman pada tahun 2014, sehingga *total CO<sub>2</sub> load* dapat diketahui. Sedangkan *total CO<sub>2</sub> capacity* didapat dari riset oleh Satyana dkk pada tahun 2003, sehingga *average CO<sub>2</sub> injection rate* dapat diketahui.

Tabel 3.3. Data laju aliran, *total CO<sub>2</sub> load* dan *total CO<sub>2</sub> capacity* *source* dan *sink*

<i>Source site</i>	<i>Average CO<sub>2</sub> captured rate (Mt/y)</i>	<i>Total CO<sub>2</sub> load (Mt)</i>	<i>Sink site</i>	<i>Average CO<sub>2</sub> injection rate (Mt/y)</i>	<i>Total CO<sub>2</sub> capacity (Mt)</i>
PLN Bukit Asam	1,786	44,65	I2	0,17	4,25
RU III Plaju	0,619	15,475	H2	0,21	5.25
PT Merbau GGS	0,133	3,325	3	0,96	48
PT Semen Batu Raja	0,501	25,05	Banyu Urip	0,0873	3,143
Pusri Palembang	2,507	50,14	Suko wati	0,06286	3,143



ng					
			Mudi	0,05714	3,143

(Usman, 2014, Satyana dan Purwaningsih, 2003)

### 3.3 Penentuan dan Pengolahan Data

Penelitian ini menggunakan variabel yaitu  $\Delta t$  (jeda waktu) minimum dikarenakan terdapat kemungkinan kemunduran waktu operasi dari proses CCS seperti ketidaksiapan sink dalam menerima load  $CO_2$ .  $\Delta t$  minimum ini akan berpengaruh pada waktu optimal yang bisa diterapkan dalam sistem CCS. Variabel  $\Delta t$  minimum yaitu 0 tahun, 5 tahun dan 10 tahun.

Berikut adalah data yang akan digunakan pada penelitian ini:

#### 1. *Single Region*

Meliputi data *source* dan *sink* berada di wilayah Sumatera Selatan

#### 2. *Multi Region*

Meliputi data *source* di wilayah Sumatera Selatan dan *sink* berada di wilayah Jawa Timur dan Sumatra Selatan.

Tabel 3.4. Data *Source* ( $CO_2$  Captured Load) studi kasus Sumatera Selatan

No	Source site	Start to end (y)	Plant life (y)	Average $CO_2$ captured rate (Mt/y)	Total $CO_2$ load (Mt)
1	PLN Bukit Asam	5-30	25	1,786	44,65
2	RU III Plaju	7-32	25	0,619	15,475
3	PT Merbau GGS	15-40	25	0,133	3,325
4	PT Semen Batu Raja	10-60	50	0,501	25,05
5	Pusri Palembang	12-32	20	2,507	50,14

Total	138,64
-------	--------

Tabel 3.5. Data *Sink* Studi Kasus Sumatera Selatan

No	<i>Sink site</i>	<i>Start to end (y)</i>	<i>Reservoir life planning (y)</i>	<i>Average CO<sub>2</sub> injection rate (Mt/y)</i>	<i>Total CO<sub>2</sub> capacity (Mt)</i>
1	I2	7-32	25	0,17	4,25
2	H2	4-29	25	0,21	5.25
3	3	2-52	50	0,96	48
Total					57,5

(Usman, 2014)

Tabel 3.6. Data *Sink* Studi Kasus Jawa Timur

No	<i>Sink site</i>	<i>Start to end (y)</i>	<i>Reservoir life planning (y)</i>	<i>Average CO<sub>2</sub> injection rate (Mt/y)</i>	<i>Total CO<sub>2</sub> capacity (Mt)</i>
1	Banyu Urip	10-46	36	0,0873	3,143
2	Sukowati	20-70	50	0,06286	3,143
3	Mudi	30-85	55	0,05714	3,143
Total					9,429

(Satyana dan Purwaningsih, 2003)

Table 3.7. Rangkuman Data *Source* dan *Sink*

Stream	(y)	Mt/y	Mt
SR1	5-30	1,786	44,65

SR2	7-32	0,619	15,475
SR3	15-40	0,133	3,325
SR4	10-60	0,501	25,05
SR5	12-32	2,507	50,14
SK1	7-32	0,17	4,25
SK2	4-29	0,21	5,25
SK3	2-52	0,96	48
SK4	10-46	0,0873	3,143
SK5	20-70	0,06286	3,143
SK6	30-85	0,05714	3,143

### 3.4 Pembuatan *Cascade Table*

Pada metode *cascade table* ini akan menghitung jumlah minimum *alternative* dan *unutilized sink (utility sink)* serta tahun *pinch* yang digunakan untuk mendesain jaringan perpindahan massa CO<sub>2</sub> dengan diagram grid. Perhitungan *cascade table* menerapkan metode yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya oleh Diamante dkk pada tahun 2014. Tahapan pembuatan/Heuristik *cascade table* adalah sebagai berikut :

1. Plot kolom *t, sources, sink, Δt, flowrate CO<sub>2</sub>, Load CO<sub>2</sub>, infeasible* dan *feasible cascade* sesuai pada gambar di bawah.
2. Plot garis stream *sources* dan *sink* pada kolom *source* dan *sink* sesuai dengan tahunnya.
3. Kolom  $\Delta t$  = adalah selisih tahun
4. Kolom *flowrate CO<sub>2</sub>* adalah  $\Sigma SK - \Sigma SR$
5. Kolom *load CO<sub>2</sub>* = *flowrate CO<sub>2</sub>* x  $\Delta t$
6. Perhitungan untuk *shifted* tahun untuk  $\Delta t$  (0,5,10) dilakukan dengan menambahkan (0,5,10) tahun pada awal dan akhir tahun *sink* beroperasi.

Dibawah ini adalah contoh *cascade table*:

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate $CO_2$ (Mt/y)	Load $CO_2$ (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	18.116
	1.786		2	-1.786	-3.572		
7		SK1				-3.572	14.544
		0.170	9	-1.616	-14.544		
16						-18.116	0
			4	0.170	0.680		
20						-17.436	0.68

Gambar 3.2. Contoh proses pembuatan *cascade table*

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate $CO_2$ (Mt/y)	Load $CO_2$ (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	18.966
	1.786		7	-1.786	-12.502		
12		SK1				-12.502	6.464
		0.170	4	-1.616	-6.464		
16						-18.966	0
			9	0.170	1.530		
25						-17.436	1.53

Gambar 3.3. Contoh proses pembuatan *shifted cascade table*  $\Delta t$  5

### 3.5 Menentukan Minimum *Utility Storage* dengan Metode *Linear Programming*

Pada metode *linear programming* ini juga akan menghitung jumlah minimum *alternative* dan *unutilized sink (utility sink)* serta tahun *pinch* yang digunakan untuk mendesain jaringan perpindahan massa  $CO_2$  dengan diagram grid. Perhitungan ini dilakukan untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan *cascade table*. Jika hasil perhitungan *Linear Programming* telah sama dengan *cascade table* maka dapat melanjutkan tahapan selanjutnya yaitu pembuatan diagram grid. Perhitungan *cascade*

*table* menerapkan metode yang dilakukan oleh Seider dkk pada tahun 2003.

*Objective Function*-nya adalah minimum *utility storage* dan data yang perlu diinputkan adalah *load CO<sub>2</sub>*. *Software* yang digunakan adalah GAMS (*General Algebraic Modelling System*). Struktur umum/ heuristik dari program GAMS dapat dibagi menjadi 3 model utama.

1. DATA
  - Deklarasi dan mendefinisikan SETS
  - Deklarasi PARAMETERS
  - *Data assignment*
2. MODEL
  - Deklarasi VARIABLES
  - Deklarasi EQUATIONS
  - Definisi *equations*
  - Definisi MODEL penyelesaian
3. SOLUTION
  - SOLVE *statement*
  - Tampilan hasil

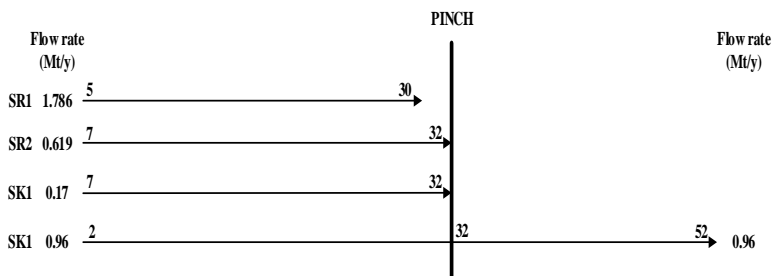
### 3.6 Pembuatan Diagram Grid

Pada metode *cascade table* ini akan mendesain jaringan perpindahan massa CCS. Pembuatan diagram grid akan dilakukan dengan dua cara yaitu simultan dan cara kedua (*sequencial*). Kedua proses pembuatan diagram grid tersebut terdapat beberapa langkah/ heuristik yang memiliki kesamaan dan juga terdapat perbedaan. Perhitungan diagram grid menerapkan metode yang dilakukan oleh Smith pada tahun 2005.

Tahapan pembuatan/ heuristik diagram grid simultan adalah sebagai berikut:

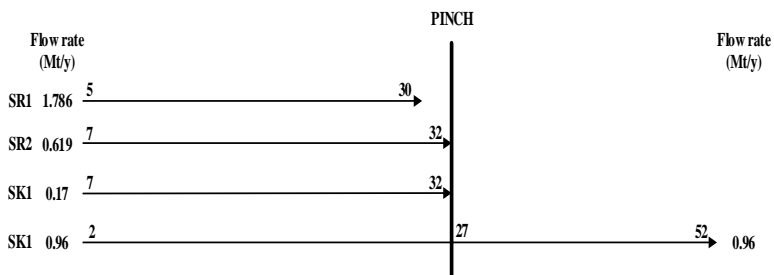
1. Buat garis vertikal sebagai garis *pinch*
2. Buat garis horisontal dimana garis tersebut mewakili *source* dan *sink*. Garis horisontal berturut-turut dibuat sejajar kebawah dimulai dari SR1 s/d SR5 dilanjutkan dengan SK1 s/d SK6.

Arah garis dimulai dari kiri ke kanan dengan awal garis merupakan awal tahun operasi dan akhir garis merupakan akhir tahun operasi.



Gambar 3.4. Contoh penerapan langkah 1 dan 2

- Perhitungan untuk *shifted* tahun dilakukan dengan mengurangi waktu pinch *sink* sebesar (0,5,10) untuk masing-masing  $\Delta t$  (0,5,10) pada diagram grid.



Gambar 3.5. Contoh penerapan langkah 3, *shifted* tahun  $\Delta t$  5

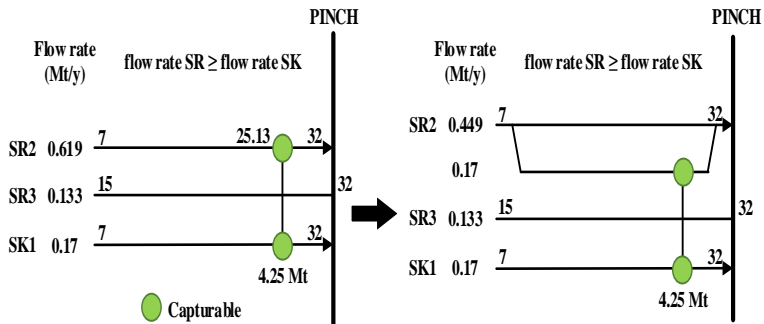
- Diagram grid terdiri dari 2 bagian/ daerah, yaitu daerah dibawah *pinch* dan diatas *pinch*. Bagian sebelah kiri garis *pinch* merupakan daerah dibawah *pinch* dan bagian sebelah kanan garis *pinch* merupakan daerah diatas *pinch*. Terdapat beberapa aturan untuk desain proses integrasi/ perpindahan massa diantara *source* dan *sink* yang digambarkan pada diagram grid, yaitu:

1. Proses integrasi/ perpindahan massa pada daerah di bawah *pinch*, laju aliran *source*  $\geq$  *sink*. Sedangkan pada daerah di atas *pinch* laju aliran *source*  $\leq$  *sink*.
2. Proses integrasi/ perpindahan massa dimulai dari *pinch*.
3. Pada daerah di bawah *pinch* tidak boleh terdapat *unutilized storage* dan pada daerah di atas *pinch* tidak boleh terdapat *alternative storage*.
5. Proses *pairing*/ pencocokkan antara *source* dan *sink* juga memerhatikan waktu antara *source* dan *sink* yang dihubungkan.

Carilah *pairing* yang memiliki selisih waktu sesuai  $\Delta t$  yang dibuat atau mendekati  $\Delta t$  yang dibuat. Misal proses untuk  $\Delta t$  0, maka *pairing* antara *source* dan *sink* harus selisih 0 atau mendekati 0. Untuk mendapatkan selisih yang sesuai atau mendekati dengan  $\Delta t$  maka kemungkinan pada proses *pairing* dilakukan *split* aliran/ pembagian aliran *source* dan *sink*.

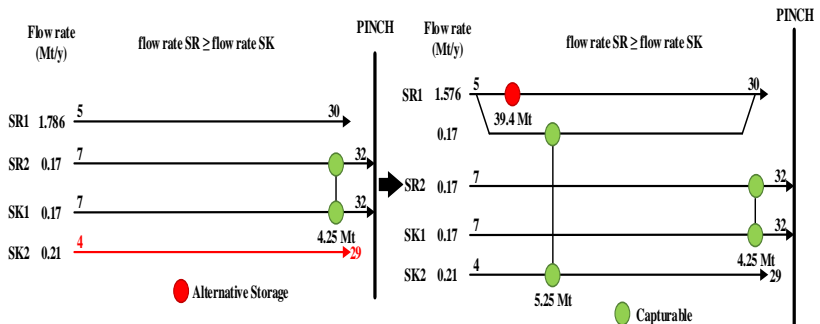
Tahapan/ Heuristik proses *split*:

1. Proses *split* dilakukan jika jaringan perpindahan tidak dapat dihubungkan karena tidak memenuhi aturan *pinch* atau jaringan perpindahan memiliki  $\Delta t$  yang terlalu jauh dari  $\Delta t$  yang ditetapkan.
2. Proses *split* dilakukan dengan membagi satu aliran *source* atau *sink* menjadi beberapa bagian dengan nilai yang sesuai.
3. Tahun mulai dan akhir aliran tidak berubah/ sama dengan tanpa *split*. Contoh berdasarkan Gambar 3.6 suatu aliran *source* dengan laju aliran 0.619 Mt/tahun akan dibagi menjadi 2 aliran, maka kemungkinan akan dua aliran dengan laju aliran masing-masing 0.17 Mt/tahun, dan 0.449 Mt/tahun dengan kedua aliran tersebut sama-sama dimulai pada tahun ke 7 s/d 32.



Gambar 3.6. Contoh penerapan langkah 4 s/d 5 dan proses *split*

6. Jika proses *pairing* telah dilakukan dengan mengikuti aturan 1 dan 2 tetapi aturan 3 belum terpenuhi atau dengan kata lain masih terdapat *sink* yang belum terpenuhi pada daerah di bawah *pinch* (*unutilized storage*) dan masih terdapat *source* yang belum ditransfer pada daerah di atas *pinch* (*alternative storage*), maka dapat dilakukan *pairing* selanjutnya dengan tidak mengikuti aturan 1 dan 2.

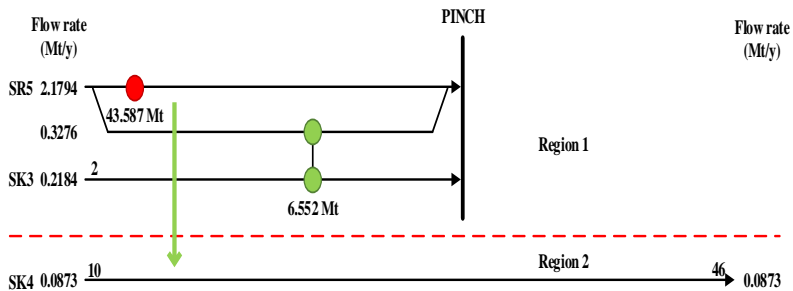


Gambar 3.7. Contoh penerapan langkah 6

Tahapan pembuatan/ heuristik *diagram grid* cara kedua (*sequencial*) adalah sebagai berikut:



1. Pembuatan diagram grid simultan dengan batasan wilayah *single regional* (sumatera selatan), yaitu SR1 s/d SR5 dan SK1 s/d SK3.
2. *Alternative storage* yang dibutuhkan pada sistem tersebut/ emisi CO<sub>2</sub> yang tidak tersimpan dalam ketiga *sink* tersebut selanjutnya ditransfer/ disimpan ke dalam 3 *sink* yang berada pada wilayah *regional* lain (Jawa Timur) SK4, SK5, SK6.
3. Proses *pairing multi regional* dilakukan juga memerhatikan waktu antara *source* dan *sink* yang dihubungkan. Carilah *pairing* yang memiliki selisih waktu sesuai  $\Delta t$  yang dibuat atau mendekati  $\Delta t$  yang dibuat. Sehingga, memungkinkan pada proses *pairing* ini juga dilakukan *split* aliran/ pembagian aliran *source* dan *sink*.
4. Proses *pairing multi regional* tidak memerhatikan aturan *pinch*.



Gambar 3.8. Contoh penerapan langkah diagram grid *sequential*

### 3.7 Optimisasi Berdasarkan *Total Annualized Cost*

Pada penelitian ini, yang akan dioptimisasi adalah beban yang ditransfer antara *source* dan *sink* yang tersedia dengan memperhitungkan TAC yang terdiri dari *annual operating cost* (AOC) dan *annual capital cost* (ACC). TAC yang terendah merupakan biaya optimal pada  $\Delta t$  yang sesuai. Beberapa biaya utama yang diperhitungkan dalam penentuan TAC yaitu biaya

transportasi dan biaya *penalty*. Biaya transportasi dari *source* CO<sub>2</sub> menuju *sink* CO<sub>2</sub> bergantung pada laju aliran massa CO<sub>2</sub>, jarak antara *source* dan *sink*, dan jenis alat transportasi dari CO<sub>2</sub> tersebut. Berdasarkan letak geografis antara masing-masing *source* dan *sink* maka ditetapkan pada penelitian ini alat transportasi dari CO<sub>2</sub> yang digunakan adalah sistem perpipaan dan sistem perkapalan. Sistem perkapalan terdiri dari 3 bagian, yaitu biaya kapal, biaya *intermediate storage* di pelabuhan, dan biaya fasilitas bongkar muat. Sedangkan biaya *penalty* terdiri dari biaya *penalty alternative storage* dan *unutilized storage*. Sehingga, terdapat beberapa perhitungan untuk menghitung biaya TAC, yaitu :

1. ACC (perpipaan, perkapalan)
2. AOC (perpipaan, perkapalan, *penalty alternative storage*, *penalty unutilized storage*)

Tahapan perhitungan ACC dan AOC perpipaan:

1. Variabel pendukung (Heddle dkk, 2003)  
 $P_{\text{masuk}} = 152 \text{ bar}$ ,  $P_{\text{keluar}} = 103 \text{ bar}$ ,  $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho = 884 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.0000606 \text{ Ns/m}^2$ , *surface roughness* ( $\epsilon$ ) =  $0.00015 \text{ m}$  (*galvanized iron*), *construction cost factor* =  $\text{Rp } 10,983,692,440.9 \text{ /m.km}$ , *O&M cost factor* =  $\text{Rp } 41,205,200 \text{ /km}$ .
2. Perhitungan ACC perpipaan  
 Perhitungan ACC dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu:

1. Menghitung diameter pipa (D)  
 Perhitungan dilakukan berdasarkan perhitungan *pressure drop* dan *friction factor* pada aliran turbulen (Geankoplis, 4<sup>th</sup> ed. hal 93). Perhitungan diameter pipa dilakukan dengan proses iterasi, pertama yaitu menghitung *Reynold number* dengan nilai D pertama diasumsi.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D}$$

m merupakan laju aliran massa CO<sub>2</sub> yang di transfer yang didapat dari hasil jaringan diagram grid. Setelah itu mencari nilai *fanning friction (f)* berdasarkan hubungan *Reynold number* dengan *friction factor* pada grafik Moody (Perry dan Green, 2008).

$$friction\ factor = \frac{\varepsilon}{D}$$

kemudian dicari nilai D baru dengan persamaan dibawah ini.

$$D^5 = \frac{32f\dot{m}^2}{\pi^2\rho\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)}$$

Perhitungan di atas diulang kembali sampai didapatkan nilai D konstan. Nilai D yang konstan merupakan nilai diameter yang dicari.

## 2. Menghitung ACC perpipaan

Setelah didapatkan diameter dari pipa, selanjutnya dihitung ACC dengan persamaan:

*ACC perpipaan*

$$= construction\ cost\ factor \times D \times jarak \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Biaya keseluruhan ( $\Sigma$  ACC) perpipaan merupakan jumlah ACC keseluruhan pipa.

## 3. Menghitung AOC perpipaan

Perhitungan AOC dihitung dengan persamaan berikut :

$$AOC\ perpipaan = O\&M\ cost\ factor \times jarak$$

Biaya keseluruhan ( $\Sigma$  AOC) perpipaan merupakan jumlah AOC keseluruhan pipa.

Tahapan perhitungan ACC dan AOC perkapalan:

## 1. Variabel pendukung (Mitsubishi Heavy Industries, 2004)

### a. Biaya kapal

Kapasitas kapal = 10,000 ton/hari, *construction cost* kapal = Rp 465,220,000,000, *Crew*, *Insurance*,

*Maintenance (CIM) cost = 5 % construction cost, fuel cost = \$ 9150 /hari*

- b. Biaya *Intermediete Storage* (IS) di pelabuhan  
Kapasitas IS = 20,000 ton/hari, *construction cost* IS = Rp 398,760,000,000, *O&M cost = 5 % construction cost*
- c. Biaya fasilitas Bongkar Muat (BM)  
Kapasitas BM = 20,000 ton/hari, *construction cost* BM = Rp 106,336,000,000, *O&M cost = 25 % construction cost*

2. Menghitung ACC perkapalan

Perhitungan untuk ACC perkapalan terdiri dari 3 bagian, yaitu ACC kapal, IS, dan BM. Masing-masing perhitungan ACC dilakukan dengan cara membandingkan sistem yang telah ada dengan persamaan:

*ACC A*

$$= \text{construction cost } B \times \left( \frac{\text{kapasitas } A}{\text{kapasitas } B} \right)^{0,6} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

A merupakan sistem yang dicari, sedangkan B merupakan sistem yang telah ada. Kapasitas dari sistem perkapalan merupakan total jumlah laju aliran massa CO<sub>2</sub> (ton) per hari yang di transfer menuju *sink* di wilayah jawa timur. Biaya keseluruhan ( $\Sigma$  ACC) perkapalan merupakan jumlah ACC kapal, IS, dan BM.

3. Menghitung AOC perkapalan

Perhitungan untuk AOC perkapalan terdiri dari 3 bagian, yaitu AOC kapal, IS, dan BM.

a. AOC kapal

$$\text{AOC kapal} = \text{CIM cost kapal} + \text{fuel cost}$$

b. AOC IS

$$\text{AOC IS} = \text{O\&M cost IS}$$

c. AOC BM

$$\text{AOC BM} = \text{O\&M cost BM}$$

Biaya keseluruhan ( $\Sigma$  AOC) perkapalan merupakan jumlah AOC kapal, IS, dan BM.

Tahapan perhitungan AOC *penalty*:

1. Variabel pendukung (Sofyan, 2010)  
 $Carbon\ tax = Rp\ 280,000\ /tahun$
  2. Menghitung AOC *penalty alternative storage*  
 $AOC\ penalty\ alternative\ storage$   
 $= carbon\ tax \times \text{laju aliran massa } alternative\ storage$
  3. Menghitung AOC *penalty unutilized storage*  
 $AOC\ penalty\ unutilized\ storage$   
 $= carbon\ tax \times \text{laju aliran massa } unutilized\ storage$
- Biaya keseluruhan ( $\Sigma$  AOC) *penalty* merupakan jumlah AOC *penalty alternative storage* dan AOC *penalty unutilized storage*.

Perhitungan *Total Annual Capital Cost* (TACC):

$$TACC = \Sigma ACC\ \text{perpipaan} + \Sigma ACC\ \text{perkapalan}$$

Perhitungan *Total Annual Operating Cost* (TAOC):

$$TAOC = \Sigma AOC\ \text{perpipaan} + \Sigma AOC\ \text{perkapalan} \\ + \Sigma AOC\ \text{penalty}$$

Perhitungan TAC:

$$TAC = TACC + TAOC$$

Selain dilakukan secara manual, perhitungan juga dilakukan dengan menggunakan software Matlab R2015b. Struktur umum dari program Matlab yang digunakan terdiri dari 2 struktur utama.

1. Variabel dan Operator

Penulisan variabel di dalam matlab tidak perlu dideklarasikan, karena matlab mampu mengenali tipe data dari variabel tersebut. Aturan penulisan variabel pada matlab bersifat *case sensitive*, diawali dengan huruf dan selanjutnya boleh menggunakan gabungan huruf-angka atau tanda garis bawah. Matlab mampu mengenali sampai 31 karakter pertama. Penulisan operator sama seperti Bahasa

pemrograman lainnya seperti penjumlahan (+), pengurangan (-), perkalian (\*), pembagian (/), dll.

2. Fungsi

Fungsi merupakan perhitungan dari argumen *input* dan menghasilkan argumen *output*. Persamaan-persamaan dalam perhitungan adalah sebagai fungsi..

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pendekatan Target Jaringan Perpindahan Massa CCS *Multi Region*

Studi kasus yang diambil pada penelitian ini merupakan dua wilayah (*multi region*). Pada tabel 4.1, sistem tersebut mengandung 5 *source* CO<sub>2</sub> dan 6 *sink* CO<sub>2</sub>. *Source* CO<sub>2</sub> dan *sink* tertera dengan berbagai waktu yang berbeda selama rentang perencanaan dan juga berakhir pada periode waktu yang berbeda.

Dari tabel karakteristik *source* dan *sink* tersebut disusun secara berurutan dengan berdasarkan waktu awal dan ditempatkan pada diagram dengan waktu sebagai ordinat *versus* jumlah beban CO<sub>2</sub> pada absis. Penguraian interval waktu berdasarkan *source* yang bertumpang tindih antara periode waktu yang lain. Untuk beberapa interval waktu dengan berbagai *source* kontribusi beban CO<sub>2</sub> merupakan penjumlahan dari beban CO<sub>2</sub> yang dikontribusikan oleh beberapa CO<sub>2</sub> pada setiap interval waktu.

Tabel 4.1 Karakteristik *Source* dan *Sink*

<i>Source</i>	<i>Flowrate</i> CO <sub>2</sub>	Beban CO <sub>2</sub>	Waktu mulai	Waktu akhir
	(Mt/y)	(Mt)	(y)	(y)
1	1,786	44,65	5	30
2	0,619	15,475	7	32
3	0,133	3,325	15	40
4	0,501	25,05	10	60
5	2,507	50,14	12	32
Total		138,64		
<i>Sink</i>	Injektivitas	Kapasitas <i>storage</i>	Waktu mulai	Waktu akhir
	(Mt/y)	(Mt)	(y)	(y)

1	0,17	4,25	7	32
2	0,21	5,25	4	29
3	0,96	48	2	52
4	0,0873	3,143	10	46
5	0,06286	3,143	20	70
6	0,05714	3,143	30	85
Total		66,929		

#### 4.1.1 Table Cascade CCS System

Analisis pasangan jaringan CCS juga dibandingkan dengan menggunakan *problem table cascade*. Analisis *cascade* yang dikembangkan ini analog dengan analisis *cascade* pada jaringan penukar panas. Telah dilakukan analisis *cascade* pada studi kasus ini yang memiliki 5 *source* dan 6 *sink* dengan titik *pinch* berada pada delta waktu 0 tahun.

Dapat dilihat dari tabel dibawah ini yaitu hasil pengerjaan tabel *cascade*. Pada  $\Delta t=0$  tahun titik *pinch* berada pada tahun ke-32. Sedangkan pada  $\Delta t=5$  dan  $\Delta t=10$  tahun titik *pinch* juga pada tahun ke-32. Untuk perhitungan  $\Delta t=5$  dan  $\Delta t=10$  dapat dilihat di lampiran.



Tabel 4.2 Tabel *cascade* CCS dengan Delta Waktu *Pinch* 0 tahun

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
2		SK3				0	82.459
		0.96	2	0.960	1.920		
4		SK2				1.920	84.379
		0.21	1	1.170	1.170		
5	SR1					3.090	85.549
	1.786		2	-0.616	-1.232		
7	SR2	SK1				1.858	84.317
	0.619	0.17	3	-1.065	-3.195		
10						-1.337	81.122
	SR4	SK4					
	0.501	0.0873	2	-1.479	-2.957		
12						-4.294	78.164
	SR5						
	2.507		3	-3.986	-11.957		
15	SR3					-16.252	66.207
	0.133		5	-4.119	-20.594		
20		SK5				-36.845	45.614
		0.06286	9	-4.056	-36.503		
29						-73.348	9.111
			1	-4.266	-4.266		
30		SK6				-77.613	4.845
		0.05714	2	-2.423	-4.845		
32						-82.459	0
			8	0.533	4.266	(PINCH)	
40						-78.192	4.266
			6	0.666	3.998		
46						-74.195	8.264
			6	0.579	3.474		
52						-70.721	11.738
			8	-0.381	-3.048		
60						-73.769	8.690
			10	0.120	1.200		
70						-72.569	9.890
			15	0.057	0.857		
85						-71.712	10.747

#### 4.1.2 Menghitung Minimum Utility Storage dengan Metode *Linear Programming*

Pemeriksaan lebih dekat pada metode *targeting* jaringan CCS menunjukkan bahwa utilitas *alternatif storage* dan *unutilized storage* dapat dihitung dengan *Linear Programming* (LP). Perhitungan dengan LP bertujuan untuk mencari minimum utilitas storage. Input pada LP adalah dari perhitungan dari *cascade table*. Perlu diketahui bahwa hasil perhitungan LP akan memiliki nilai yang sama dengan hasil *cascade table*.

Berikut adalah hasil pengerjaan GAMS LP pada penentuan jaringan CCS pada  $\Delta t=0$  tahun :

#### **GAMS Program**

VARIABLES

```

AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10,
R11, R12, R13, R14,R15
Z;
POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10,
R11, R12, R13, R14, R15, AltStrg, UntStrg;
EQUATIONS
OBJ      define objective function
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14,
T15, T16;
OBJ.. Z =E= AltStrg;
T1.. AltStrg - R1 + 1.920 =E= 0;
T2.. R1 - R2 + 1.170 =E= 0;
T3.. R2 - R3 - 1.232 =E= 0;
T4.. R3 - R4 - 3.195 =E= 0;
T5.. R4 - R5 - 2.957 =E= 0;
T6.. R5 - R6 - 11.957 =E= 0;
T7.. R6 - R7 - 20.594 =E= 0;
T8.. R7 - R8 - 36.503 =E= 0;
T9.. R8 - R9 - 4.266 =E= 0;
T10.. R9 - R10 - 4.845 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 4.266 =E= 0;
T12.. R11 - R12 + 3.998 =E= 0;
T13.. R12 - R13 + 3.474 =E= 0;
T14.. R13 - R14 - 3.048 =E= 0;
T15.. R14 - R15 + 1.2 =E= 0;
T16.. R15 - UntStrg + 0.857 =E= 0;

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;
DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, R12.L, R13.L, R14.L, R15.L, AltStrg.L,
UntStrg.L;

```

### **GAMS Solution**

```

**** SOLVER STATUS           1 Normal Completion
**** MODEL STATUS           1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE                82.459

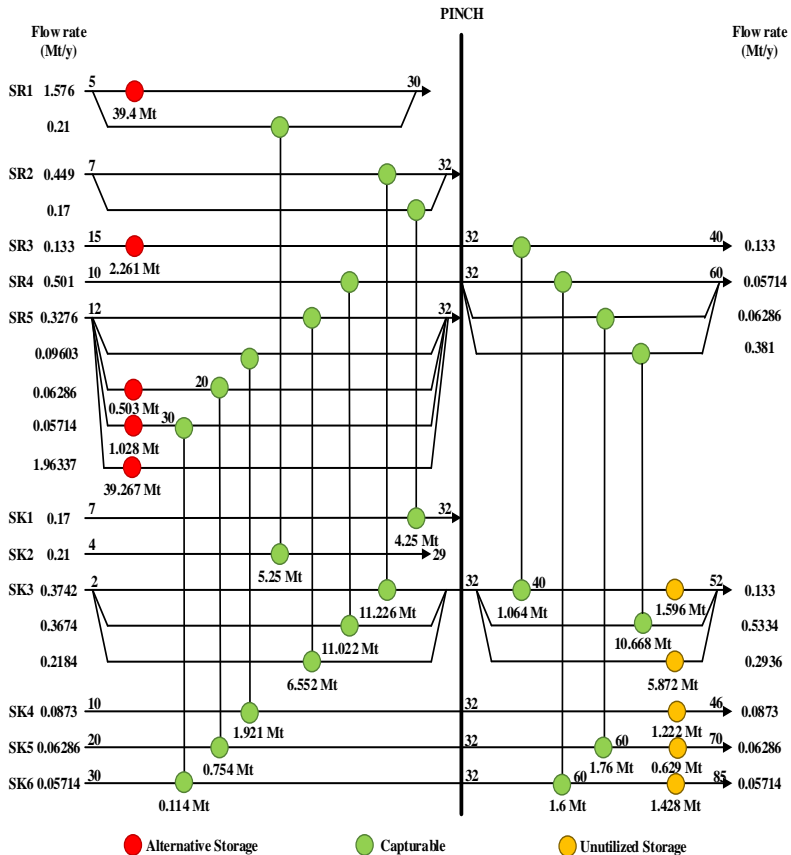
```

VARIABLE R1.L	=	84.379
VARIABLE R2.L	=	85.549
VARIABLE R3.L	=	84.317
VARIABLE R4.L	=	81.122
VARIABLE R5.L	=	78.165
VARIABLE R6.L	=	66.208
VARIABLE R7.L	=	45.614
VARIABLE R8.L	=	9.111
VARIABLE R9.L	=	4.845
VARIABLE R10.L	=	0.000
VARIABLE R11.L	=	4.266

VARIABLE R12.L	=	8.264
VARIABLE R13.L	=	11.738
VARIABLE R14.L	=	8.690
VARIABLE R15.L	=	9.890
VARIABLE AltStrg.L	=	82.459
VARIABLE UntStrg.L	=	10.747

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan pada  $\Delta t=0$  *alternative storage* sebesar 82,459 Mt dan *unutilized storage* sebesar 10,747 Mt. Untuk perhitungan  $\Delta t=5$  dan  $\Delta t=10$  dapat dilihat di lampiran. Metode *Linear Programming* GAMS dapat menentukan utilitas *storage* minimum pada CCS system dengan akurat, akan tetapi kurang efisien karena memerlukan input data dari *cascade table*.

### 4.1.3 Diagram Grid CCS System



Gambar 4.1 Diagram Grid CCS dengan Delta Waktu *Pinch* 0 tahun

Titik *Pinch* pada diagram tersebut membagi sistem tersebut menjadi 2 wilayah. Sebelum titik *pinch*, terdapat wilayah dimana CO<sub>2</sub> tersebut membutuhkan *storage*. Sementara setelah titik *pinch*, terdapat ekses *sink*. Skenario diatas merupakan salah satu problema yang terjadi pada jaringan ini, karena hampir semua

lokasi *sink* yang potensial akan mengalami beberapa keterlambatan sebelum *sink* menerima CO<sub>2</sub> dari *source*.

Dari tabel *cascade* 4.2 menunjukkan bahwa *sink* mulai pada tahun ke 2. Dengan kata lain, penyimpanan alternatif harus dicari pada 2 tahun pertama operasi. Apabila tidak tersedia penyimpanan eksternal, maka keputusan untuk menangkap CO<sub>2</sub> harus ditangguhkan pada tahun ke 2, pada saat *sink* internal telah siap untuk digunakan.

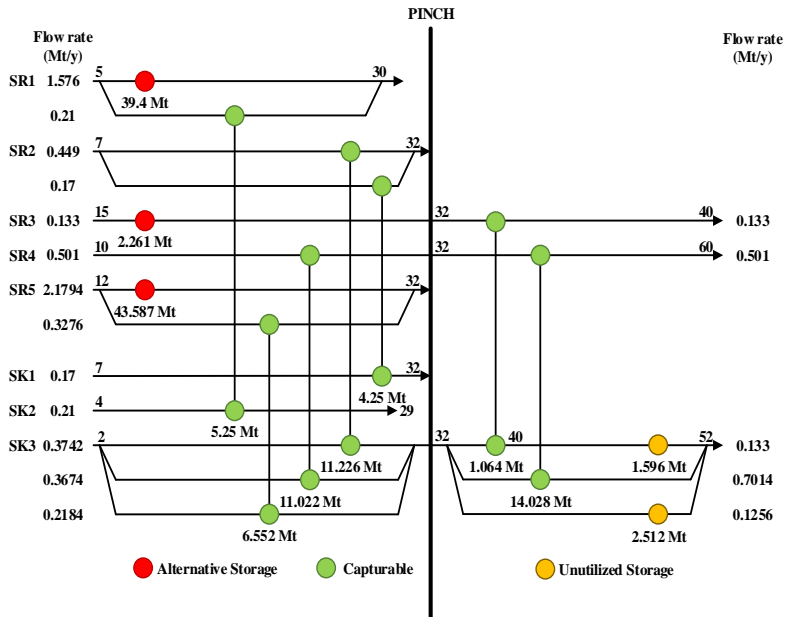
Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa SK1 menerima CO<sub>2</sub> dari SR2 pada rentang waktu tahun ke 7 sampai 32. Sementara itu, CO<sub>2</sub> dari SR1 dikirim ke SK2 yang berakhir sampai tahun ke 29. Begitu pula untuk pasangan grid perpindahan massa yang lain pada  $\Delta t = 0$  tahun. Grid diagram yang diperoleh sesuai dengan perhitungan analisis tabel *cascade* dan GAMS. Sehingga didapatkan kebutuhan *alternative storage* sebesar 82,459 Mt dan *unutilized storage* 10,747 Mt.

Namun, dalam sebuah *plant* yang terjadi tidak mungkin sesuai titik *pinch* dengan delta waktu 0 tahun. Dari penelitian ini, dibuat pula jaringan optimisasi dengan variabel delta waktu 5 dan 10 tahun. Hal tersebut dilandaskan dengan kejadian nyata pada sebuah *plant carbon capture* yang mengalami keterlambatan (*delay*) pengiriman *source* ke *sink*. Hasil desain kurva komposit, tabel *cascade*, dan diagram grid transfer massa secara *sequential*  $\Delta t$  5, dan  $\Delta t$  10 ditampilkan pada Lampiran.

## **4.2 Pendekatan Target CCS *Multi Region* dengan Transfer Massa Secara *Sequential***

Selain dilakukan secara konvensional seperti bagian 4.1, desain jaringan perpindahan massa juga dilakukan secara transfer massa secara *sequential*. Cara transfer massa secara *sequential* dilakukan dengan membuat diagram grid pada wilayah *single region* kemudian hasil *alternative storage* dialirkan pada *sink* di wilayah Jawa Timur. Cara transfer massa secara *sequential* ini telah dilakukan oleh Diamante dkk pada tahun 2014. Cara transfer massa secara *sequential* ini perlu dilakukan karena dapat

diterapkan pada sistem *multi regional* untuk menurunkan jumlah *alternative storage* dan *unutilized storage*. Cara transfer massa secara *sequential* ini pertama dilakukan dengan pembuatan tabel *cascade single region* dan GAMS untuk mendapatkan *pinch single region*.



Gambar 4.2 Hasil diagram grid *single region*  $\Delta t 0$

Tabel 4.3 Tabel *cascade CCS single region*  $\Delta t$  0

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
2		SK3				0	85.248
			0.960	2	0.960	1.920	
4		SK2				1.92	87.168
			0.210	1	1.170	1.170	
5	SR1					3.09	88.338
	1.786			2	-0.616	-1.232	
7	SR2	SK1				1.858	87.106
	0.619		0.170	3	-1.065	-3.195	
10		SR4				-1.337	83.911
			0.501	2	-1.566	-3.132	
12		SR5				-4.469	80.779
			2.507	3	-4.073	-12.219	
15	SR3					-16.688	68.56
	0.133			14	-4.206	-58.884	
29						-75.572	9.676
				1	-4.416	-4.416	
30						-79.988	5.26
				2	-2.630	-5.260	
32						-85.248	0
				8	0.326	2.608	(PINCH)
40						-82.64	2.608
				12	0.459	5.508	
52						-77.132	8.116
				8	-0.501	-4.008	
60						-81.14	4.108

## GAMS Program

VARIABLES

AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11

Z;

POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, AltStrg, UntStrg;

EQUATIONS

OBJ define objective function

T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12;

OBJ.. Z =E= AltStrg;

T1.. AltStrg - R1 + 1.920 =E= 0;

T2.. R1 - R2 + 1.170 =E= 0;

T3.. R2 - R3 - 1.232 =E= 0;

T4.. R3 - R4 - 3.195 =E= 0;

T5.. R4 - R5 - 3.132 =E= 0;

T6.. R5 - R6 - 12.219 =E= 0;

T7.. R6 - R7 - 58.884 =E= 0;

```

T8.. R7 - R8 - 4.416 =E= 0;
T9.. R8 - R9 - 5.260 =E= 0;
T10.. R9 - R10 + 2.608 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 5.508 =E= 0;
T12.. R11 - UntStrg - 4.008 =E= 0;

```

```

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;
DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, AltStrg.L, UntStrg.L;

```

### GAMS Solution

```

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS       1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    85.2480

```

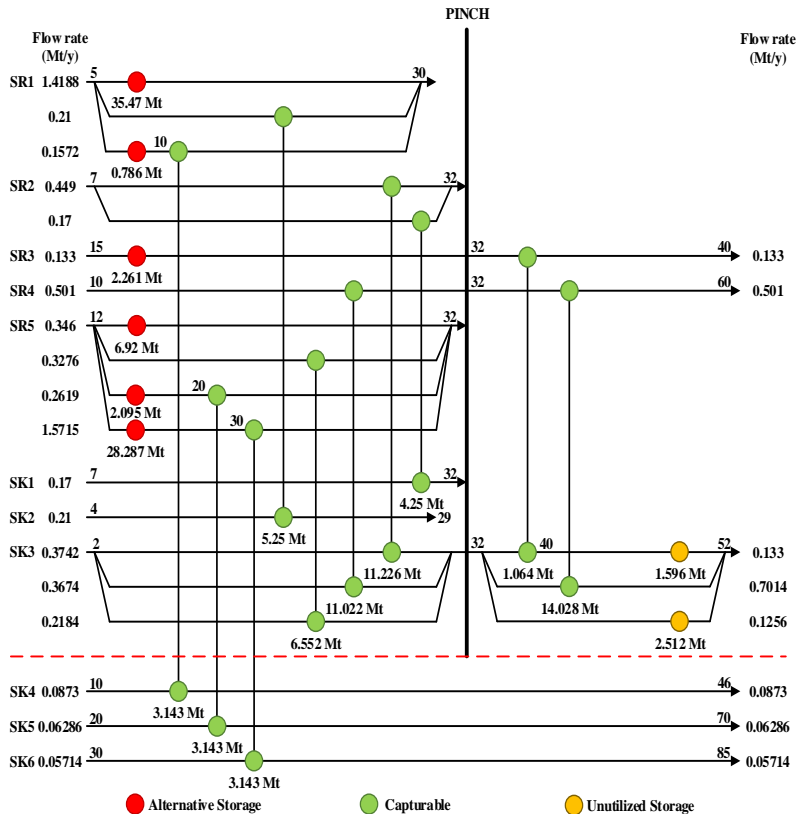
VARIABLE R1.L	=	87.168
VARIABLE R2.L	=	88.338
VARIABLE R3.L	=	87.106
VARIABLE R4.L	=	83.911
VARIABLE R5.L	=	80.779
VARIABLE R6.L	=	68.560
VARIABLE R7.L	=	9.676
VARIABLE R8.L	=	5.260
VARIABLE R9.L	=	0.000
VARIABLE R10.L	=	2.608
VARIABLE R11.L	=	8.116
VARIABLE AltStrg.L	=	85.248
VARIABLE UntStrg.L	=	4.108

Berdasarkan hasil desain tabel *cascade* dan GAMS didapatkan *pinch* untuk *single region*  $\Delta t$  0 adalah pada tahun ke 32. Jumlah *alternative storage* yang dibutuhkan sebesar 85.248 Mt, dan *unutilized storage* yang tersisa sebesar 4.108 Mt. Hasil dari kurva komposit dan tabel *cascade* selanjutnya dilakukan desain jaringan perpindahan massa dengan menggunakan diagram grid.

Hasil dari desain diagram grid (Gambar 4.2) didapatkan *source* 2 mulai tahun ke 7 sampai 32 mengirim CO<sub>2</sub> sebanyak 11.226 Mt ke *sink* 3 dan sebanyak 4.25 Mt ke *sink* 1. *Source* 4 mulai tahun ke 10 sampai 32 mengirim CO<sub>2</sub> sebanyak 11.022 Mt ke *sink* 3 dan dilanjutkan dari tahun ke 32 sampai ke 60 mengirim CO<sub>2</sub> sebanyak 14.028 Mt. Begitu pula untuk pasangan jaringan yang lain. Hasil diagram grid didapatkan jumlah *alternative*



*storage* dan *unutilized storage* sesuai dengan perhitungan kurva komposit dan tabel *cascade*, sehingga *pairing* yang dilakukan dengan diagram grid ini menghasilkan jaringan perpindahan massa CO<sub>2</sub> yang tepat. Kebutuhan *alternative storage* terdapat pada *source* 1, 3, dan 5 dengan masing-masing sebanyak 39.4 Mt, 2.261 Mt, dan 43.587 Mt. Ketiga kebutuhan *alternative storage* tersebut selanjutnya dipenuhi oleh *sink* dari *regional* lain (Jawa Timur). Sehingga, kebutuhan *alternative storage* akan berkurang.



Gambar 4.3 Hasil diagram grid transfer massa secara *sequential*  $\Delta t 0$

Berdasarkan hasil diagram grid transfer massa secara *sequential* (Gambar 4.3) didapatkan pengurangan jumlah *alternative storage* total sebesar 9.429 Mt. Kebutuhan *alternative storage source* 1 dikurangi dengan mengirim CO<sub>2</sub> sebanyak 3.143 Mt ke *sink* 4, dan kebutuhan *alternative storage source* 5 dikurangi dengan mengirim CO<sub>2</sub> sebanyak 6.286 Mt. Kebutuhan *alternative storage source* 3 tidak dapat dikurangi karena jumlah *sink* yang tersedia telah habis terpakai. Hasil desain kurva komposit, tabel *cascade*, dan diagram grid transfer massa secara *sequential*  $\Delta t$  5, dan  $\Delta t$  10 ditampilkan pada Lampiran.

Hasil dari keseluruhan desain terdapat 6 skema jaringan perpindahan massa yang dapat dilakukan. Untuk mengetahui skema jaringan yang terbaik, maka keseluruhan hasil tersebut dapat dibandingkan berdasarkan jumlah CO<sub>2</sub> yang berhasil disimpan dalam *sink* yang tersedia.

Tabel 4.4 Rangkuman hasil desain transfer massa CCS secara simultan

$\Delta t$	<i>Alternative Storage</i> (Mt)	<i>Capturable</i> (Mt)	<i>Unutilized Storage</i> (Mt)	% CO <sub>2</sub> Capture
0	82.459	56.181	10.747	83.94
5	89.394	49.246	17.682	73.58
10	96.845	41.795	25.133	62.45

Tabel 4.5. Rangkuman hasil desain transfer massa secara *sequential*

$\Delta t$	<i>Alternative Storage</i> (Mt)	<i>Capturable</i> (Mt)	<i>Unutilized Storage</i> (Mt)	% CO <sub>2</sub> Capture
0	75.819	62.821	4.108	93.86
5	85.032	53.608	13.321	80.1
10	91.732	46.908	20.021	70.09

Berdasarkan kedua tabel diatas dapat disimpulkan bahwa berdasarkan jumlah CO<sub>2</sub> yang dapat disimpan dalam *sink* yang tersedia, maka desain transfer massa secara *sequential*  $\Delta t$  0 CCS adalah desain yang terbaik dengan % CO<sub>2</sub> capture sebesar 93.86 %. Keseluruhan desain transfer massa secara *sequential* memiliki nilai lebih besar dibanding dengan desain transfer massa simultan pada setiap  $\Delta t$  nya. Hal ini terjadi karena pada desain dengan cara modif terlihat bahwa *sink* pada *regional* Jawa Timur lebih banyak terpakai dibanding dengan cara transfer massa secara simultan yang disebabkan karena pada cara transfer massa secara *sequential* proses transfer antar *regional* tidak mengikuti batasan *pinch*, sehingga jumlah CO<sub>2</sub> yang dapat disimpan dengan cara transfer massa secara *sequential* lebih banyak dibandingkan dengan cara transfer massa secara simultan. Keseluruhan hasil desain ini selanjutnya akan dioptimisasi berdasarkan analisa ekonomi TAC untuk mendapatkan desain terbaik berdasarkan biaya total tahunan (TAC) sehingga didapatkan desain yang terbaik dan efisien.

### **4.3 Optimisasi Target CCS System dengan Metode Total Annualized Cost**

Hasil perancangan desain jaringan perpindahan massa dari CCS yang dilakukan menghasilkan 6 skema cara perpindahan yang dapat digunakan untuk teknologi CCS. Berdasarkan 6 skema tersebut, selanjutnya akan didapatkan skema yang terbaik dan efisien untuk CCS. Analisa ekonomi berdasarkan TAC dipilih sebagai salah satu parameter untuk menentukan skema terbaik dan efisien dari jaringan perpindahan massa CCS yang didapat. TAC dipilih karena perhitungan biaya dihitung berdasarkan AOC dan ACC, selain itu juga memperhitungkan *interest/* kredit pinjaman modal. Sehingga, TAC dapat mempresentasikan biaya operasi tahunan dari sistem CCS lebih akurat.

TAC yang diperhitungkan adalah biaya transportasi CO<sub>2</sub> dan biaya *penalty* CO<sub>2</sub>. Biaya tersebut akan secara signifikan berbeda pada setiap desain jaringan perpindahan massa. Biaya transportasi

bergantung pada jarak, laju aliran CO<sub>2</sub>, dan waktu operasi, perbedaan pemilihan integrasi jaringan perpindahan massa dari setiap desain akan menghasilkan perbedaan jarak transportasi CO<sub>2</sub> yang berbanding lurus dengan biaya transportasi. Biaya *penalty* bergantung pada jumlah *alternative storage* yang dibutuhkan dan *unutilized storage yang tersisa*. Perbedaan  $\Delta t$  dan model (simultan dan *sequential*) akan menghasilkan perbedaan pada jumlah *alternative storage* dan *unutilized storage* yang berbanding lurus dengan biaya *penalty*. Perhitungan TAC dilakukan secara manual dan menggunakan *software* Matlab. Berikut adalah perhitungan TAC secara manual.

Tabel 4.6. Hasil perhitungan TAC transfer massa secara simultan

$\Delta t$	TAOC (Rp)	TACC (Rp)	TAC (Rp)
0	1,415,373,485,624.3	867,902,297,388.4	2,283,275,783,012.7
5	1,639,545,656,264.8	524,425,728,656.4	2,163,971,384,921.1
10	1,796,792,068,410.0	510,488,629,961.5	2,307,280,698,371.5

Tabel 4.7. Hasil perhitungan TAC transfer massa secara *sequential*

$\Delta t$	TAOC (Rp)	TACC (Rp)	TAC (Rp)
0	1,367,595,619,586.2	1,747,294,516,213.1	3,114,890,135,799.3
5	1,568,421,963,749.7	730,998,959,356.0	2,299,420,923,105.7
10	1,900,476,354,533.4	2,432,886,406,962.5	4,333,362,761,495.9

Berikut adalah perhitungan TAC menggunakan *software* Matlab:

MATLAB Command Window

```
Total Annualized Cost  
Diagram Grid Konvensional
```

```
—  
Delta Time 0 Tahun  
Total Annualized Capital Cost = 867902297388.4085  
Total Annualized Operating Cost = 1415373485624.298  
Total Annualized Cost = 2283275783012.706
```

```
—  
Delta Time 5 Tahun  
Piping cost  
Total Annualized Capital Cost = 524425728656.3652  
Total Annualized Operating Cost = 1639545656264.765  
Total Annualized Cost = 2163971384921.131
```

```
—  
Delta Time 10 Tahun  
Total Annualized Capital Cost = 510488629961.4814  
Total Annualized Operating Cost = 1796792068409.968  
Total Annualized Cost = 2307280698371.449
```

—

MATLAB Command Window

```
Total Annualized Cost  
Diagram Grid Modifikasi
```

```
—  
Delta Time 0 Tahun  
Total Annualized Capital Cost = 1747294516213.12  
Total Annualized Operating Cost = 1367595619586.167  
Total Annualized Cost = 3114890135799.287
```

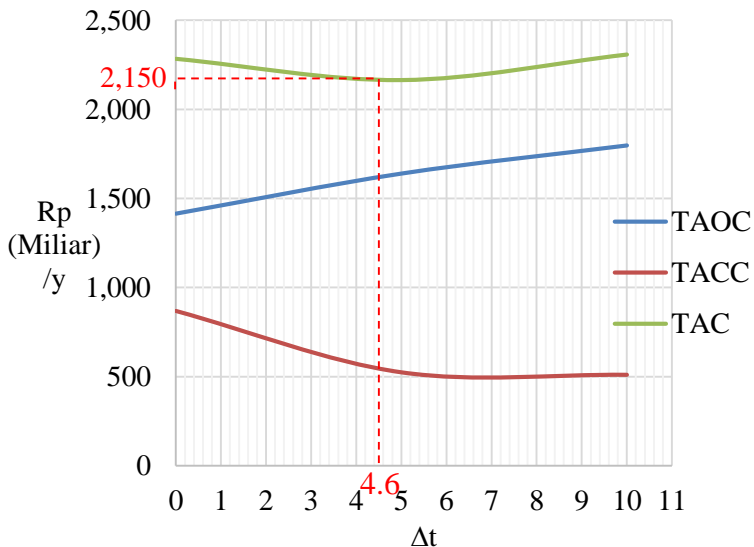
```
—  
Delta Time 5 Tahun  
Total Annualized Capital Cost = 730998959355.9937  
Total Annualized Operating Cost = 1568421963749.724  
Total Annualized Cost = 2299420923105.718
```

```
—  
Delta Time 10 Tahun  
Total Annualized Capital Cost = 2432886406962.539  
Total Annualized Operating Cost = 1900476354533.375  
Total Annualized Cost = 4333362761495.914
```

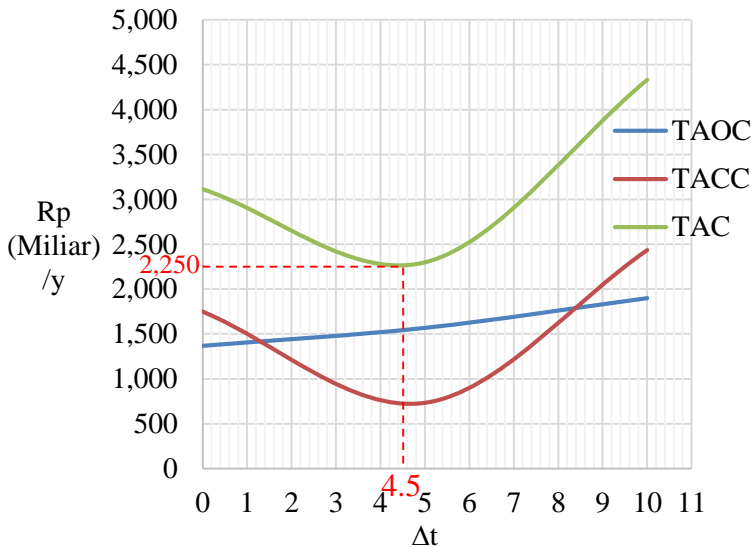
—

Input Matlab yang dikerjakan ditampilkan dalam lampiran. Berdasarkan kedua hasil pengerjaan tersebut didapatkan hasil yang sama dengan perhitungan manual. Biaya TAC yang didapat dari perhitungan Matlab pada variabel  $\Delta t$  0,  $\Delta t$  5, dan  $\Delta t$  10 transfer massa secara simultan masing-masing yaitu Rp 2,283,275,783,012.706, Rp 2,163,971,384,921.131, dan Rp 2,307,280,698,371.5. Sedangkan pada pengerjaan transfer massa secara *sequential* masing-masing yaitu Rp 3,114,890,135,799.287, Rp 2,299,420,923,105.718, dan Rp 4,333,362,761,495.914.

*Annualized Capital Cost* yang diperhitungkan terdiri dari biaya *capital* perpipaan dan perkapalan, sedangkan AOC yang diperhitungkan terdiri dari biaya operasional perpipaan, perkapalan, dan *penalty*. Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat di plot hubungan antara  $\Delta t$  dengan TAC seperti yang ditampilkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.4. Grafik hasil perhitungan TAC transfer massa secara simultan



Gambar 4.5. Grafik hasil perhitungan TAC transfer massa secara *sequential*

Berdasarkan kedua grafik diatas, nilai *operating cost* dari model transfer massa secara simultan dan transfer massa secara *sequential* menunjukkan hasil yang meningkat. Hal ini secara signifikan disebabkan oleh biaya *penalty*, semakin besar nilai  $\Delta t$  maka akan semakin besar jumlah *alternative* dan *unutilized storage* yang menyebabkan nilai *operating cost* akan semakin tinggi pula. Nilai *capital cost* pada model transfer massa secara simultan terjadi penurunan seiring dengan bertambahnya  $\Delta t$ , sedangkan pada model transfer massa secara *sequential* terjadi penurunan kemudian peningkatan kembali. Hal ini disebabkan karena pada  $\Delta t$  10 model transfer massa secara *sequential* yang dapat dilihat pada Gambar diagram grid  $\Delta t$  10 transfer massa secara *sequential* memiliki jaringan perpindahan massa *multi regional* lebih banyak dengan laju perpindahan yang besar dan

waktu operasi yang singkat dibandingkan dengan  $\Delta t$  sebelumnya, yaitu  $\Delta t$  5. *Capital cost* secara signifikan dipengaruhi oleh biaya *capital cost* perpipaan, semakin jauh jarak, semakin besar laju aliran, dan semakin singkat waktu operasi dari transportasi CO<sub>2</sub> menghasilkan biaya *capital cost* yang besar pula.

Berdasarkan hasil TAC yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa TAC optimum adalah model transfer massa secara simultan  $\Delta t$  4.6 dengan nilai TAC sebesar Rp 2.15 Triliun. Sehingga, sistem operasi CCS yang terbaik dan efisien adalah dilakukan dengan model transfer massa secara simultan  $\Delta t$  4.6. Model transfer massa secara *sequencial* tidak berhasil menunjukkan hasil yang terbaik, hal ini mungkin disebabkan karena kapasitas *sink* yang tersedia di wilayah yang jauh, *regional* lain (Jawa Timur) tidak cukup besar. Jika kapasitas *sink regional* lain cukup besar, maka kebutuhan *alternative storage* yang didapatkan dengan model transfer massa secara *sequencial* akan semakin sedikit dibanding dengan model transfer massa secara simultan sehingga biaya *penalty* akan lebih rendah. Oleh karena itu, sebagai saran untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan variasi kapasitas *sink* wilayah *multi region*.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian adalah jaringan perpindahan massa CCS *system* untuk wilayah *multi region* (Sumatera Selatan – Jawa Timur) adalah :

1. Semakin besar jeda waktu ( $\Delta t$ ) maka semakin sedikit jumlah CO<sub>2</sub> yang disimpan baik dari segi jaringan perpindahan simultan ataupun *sequencial*.
2. Metode pinch transfer *sequencial* baik digunakan jika desain lebih mengutamakan kuantitas *capturable* CO<sub>2</sub> dibanding dengan segi biaya CCS. Pada metode *pinch* transfer *sequencial* dihasilkan % *capturable* CO<sub>2</sub> paling banyak pada beda waktu 0 tahun sebesar 93,86 % daripada pengerjaan simultan dengan % *capturable* CO<sub>2</sub> sebesar 83,94 %.
3. Biaya paling efisien didapatkan pada metode *pinch* transfer simultan dengan jeda waktu ( $\Delta t$ ) 4,6 tahun dengan biaya Rp 2,15 Triliun daripada pengerjaan transfer *sequencial* dengan ( $\Delta t$ ) 4,5 tahun dengan biaya Rp 2,25 Triliun.

#### **5.2 Saran**

Dalam melakukan penelitian ini, terdapat saran yang dapat dipertimbangkan yaitu perancangan CCS system perlu dilakukan dengan variasi kapasitas *sink* wilayah *multi region* agar diketahui kapan penggunaan metode transfer simultan atau *sequencial* pada perancangan jaringan CCS *multi region*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR PUSTAKA

- CCS Organization. *What is CCS.* <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/> diakses 7 Februari 2017.
- Davison J, Freund P, dan Smith A. 2001. *Putting Carbon Back into The Ground*. Cheltenham: International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme.
- Diamante JAR, Tan RR, Foo DCY, Ng DKS, Aviso KB, dan Bandyopadhyay S. 2014. Unified Pinch Approach for Targeting of Carbon Capture and Storage (CCS) Systems with Multiple Time Periods and Regions. *Journal of Cleaner Production* 71: 67-74.
- Geankoplis CJ. 2013. *Transport Processes and Separation Process Principles 4<sup>th</sup> Edition*. United States: Pearson Education, Inc.
- Global CCS Institute. 2011. *Accelerating The Uptake Of CCS: Industrial Use Of Captured Carbon Dioxide*. Parsons Brinckerhoff.
- Heddle G, Herzog H, dan Klett M. 2003. *The Economics of CO<sub>2</sub> Storage*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Energy and the Environment.
- IEA. 2013. *Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage*. Paris: International Energy Agency.
- IPCC. 2005. *The IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*. Montreal: Intergovernmental Panel On Climate Change.
- Iskandar UP. 2009. *Assessing CCS Value Chain in Indonesia*. Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- LEMIGAS. 2009. *Understanding Carbon Capture and Storage Potential In Indonesia*. Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Linnhoff B dan Hindmarsh E. 1983. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks. *Chemical Engineering Science* 38(5): 745-763.

- Mitsubishi Heavy Industries. 2004. *Report on Ship Transport of CO<sub>2</sub>*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
- Ooi REH, Foo DCY, Ng DKS, dan Tan RR. 2012. Graphical Targeting Tool for the Planning of Carbon Capture and Storage. *Chemical Engineering Transactions* 29: 415-420.
- Ooi REH, Foo DCY, Ng DKS, dan Tan RR. 2013. Planning of Carbon Capture and Storage with Pinch Analysis Techniques. *Chemical Engineering Research and Design* 91: 2721-2731.
- Perry RH dan Green DW. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook Eighth Edition*. United States: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Satyana AH dan Purwaningsih MEM. 2003. *Geochemistry of The East Java Basin: New Observations on Oil Grouping, Genetic Gas Types and Trends of Hydrocarbon Habitats*. Proceedings, Indonesian Petroleum Association.
- Seider WD, Seader JD, dan Lewin DR. 2003. *Product and Process Design Principles Second Edition*. America: John Wiley & Sons, Inc.
- Smith R. 2005. *Chemical Process Design and Integration*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Sofyan L. 2010. *Distributional Impact Of A Carbon Tax Indonesia Case*. [Thesis]. Shinjuku: Waseda University.
- Usman, Iskandar UP, Sugihardjo, dan Lastiadi H. 2014. A Systematic Approach to Source-Sink Matching for CO<sub>2</sub> EOR and Sequestration in South Sumatera. *Energy Procedia* 63: 7750 – 7760.
- WMO. 2016. *Provisional WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2016*. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/provisional-wmo-statement-status-of-global-climate-2016/> diakses 5 Februari 2017.
- Zuchrillah DR dan Rachmawati AD. 2014. *Optimasi Jaringan Carbon Capture And Storage (CCS) System Dengan*

*Menggunakan Metode Pinch.* [Skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

## DAFTAR NOTASI

<u><i>Notasi</i></u>	<u><i>Nama</i></u>	<u><i>Satuan</i></u>
T	Temperatur	°C
P	Tekanan	N/m <sup>2</sup>
$\mu$	Viskositas	Ns/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Surface roughness	m
$\rho$	Densitas	kg/m <sup>3</sup>
f	Faktor friksi	-
Mt	Million ton	Mt
t	ton	ton
$\Delta t$	Jeda waktu	tahun
y	year	tahun
SR1	<i>Source</i> ke 1	-
SK1	<i>Sink</i> ke 1	-

Halaman ini sengaja dikosongkan

## APPENDIKS

### 1. Perhitungan Analisa Ekonomi Berdasarkan TAC

<i>Source</i>	<i>Sink</i>		
	<b>SK 1</b>	<b>SK 2</b>	<b>SK 3</b>
	<b>PP</b>		
<b>SR 1</b>	107.0	74.0	190.0
<b>SR 2</b>	88.0	165.0	136.0
<b>SR 3</b>	120.0	98.0	205.0
<b>SR 4</b>	145.0	130.0	230.0
<b>SR 5</b>	82.0	156.0	129.0

<i>Source</i>	<i>Sink</i>					
	<b>SK 4</b>		<b>SK 5</b>		<b>SK 6</b>	
	<b>PK</b>	<b>PP</b>	<b>PK</b>	<b>PP</b>	<b>PK</b>	<b>PP</b>
<b>SR 1</b>	902.0	504.0	902.0	477.0	902.0	469.4
<b>SR 2</b>	902.0	605.0	902.0	578.0	902.0	570.4
<b>SR 3</b>	902.0	602.0	902.0	575.0	902.0	567.4
<b>SR 4</b>	902.0	470.0	902.0	443.0	902.0	435.4
<b>SR 5</b>	902.0	594.0	902.0	567.0	902.0	559.4

Keterangan : PP = Perpipaan, PK = Perkapalan

**Contoh perhitungan analisa ekonomi berdasarkan TAC, modifikasi dT 0**

**Perhitungan ACC dan AOC perpipaan**

*P<sub>in</sub>*

= 152 bar

= 15,200,000 N/m<sup>2</sup>

surface roughness ( $\epsilon$ ) = 0.00015 m  
(galvanized iron)

*P<sub>out</sub>*

= 103 bar

= 10,300,000 N/m<sup>2</sup>

*O&M cost factor* = Rp 41,205,200 /km.y

*capital cost factor* = Rp 278,985,788 /in.km

T = 25 °C

*interest* = 10.5 %

$\rho$  = 884 kg/m<sup>3</sup>



$$\mu = 0.0000606 \text{ Ns/m}^2$$

(Heddle dkk, 2003)

Perhitungan ACC perpipaan

1. Menghitung diameter pipa (D)

1. Menghitung Reynold Number

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D}$$

2. Mencari nilai fanning friction (f) pada grafik Moody (Perry dan Green, 2008)

$$friction\ factor = \frac{\varepsilon}{D}$$

3. Menghitung D baru

$$D^5 = \frac{32f\dot{m}^2}{\pi^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)}$$

2. Menghitung ACC perpipaan

ACC perpipaan

$$= construction\ cost\ factor \times D \times jarak \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

### SR 1 menuju SK 2

Jarak = 74 km = 74,000 m

Waktu Operasi = 25 y

Laju alir = 0.21 Mt/y = 6.66 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	e/D	f	D	Error
1	745888.9	0.00080	0.0046	0.1025	0.0850
2	1365029.3	0.00146	0.0054	0.1058	0.0033
3	1321949.2	0.00142	0.0054	0.1058	0.0000

D akhir = 0.1058 m

ACC = Rp 9,839,613,531.2 /y

**SR 1 menuju SK 4**

Jarak = 504 km = 504,000 m

Waktu Operasi = 20 y

Laju alir = 0.1572 Mt/y = 4.98 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	558351.1	0.00080	0.00460	0.1339	0.0536
2	781703.7	0.00112	0.00510	0.1367	0.0028
3	765737.1	0.00110	0.00510	0.1367	0.0000

D akhir = 0.1367 m

ACC = Rp 91,951,769,493.9 /y

**SR 2 menuju SK 3**

Jarak = 136 km = 136,000 m

Waktu Operasi = 25 y

Laju alir = 0.449 Mt/y = 14.24 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	1594781.5	0.00080	0.00450	0.1561	0.0314
2	1915163.3	0.00096	0.00480	0.1582	0.0020
3	1890601.8	0.00095	0.00480	0.1582	0.0000

D akhir = 0.1582 m

ACC = Rp 27,035,037,819.0 /y

**SR 2 menuju SK 1**

Jarak = 88 km = 88,000 m

Waktu Operasi = 25 y

Laju alir = 0.17 Mt/y = 5.39 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	603814.8	0.00080	0.00460	0.0975	0.0900
2	1161527.6	0.00154	0.00550	0.1010	0.0035
3	1120749.5	0.00148	0.00550	0.1010	0.0000

D akhir = 0.1010 m

ACC = Rp 11,172,871,927.3 /y

**SR 3 menuju SK 3**

Jarak = 205 km = 205,000 m

Waktu Operasi = 8 y

Laju alir = 0.133 Mt/y = 4.22 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	472396.3	0.00080	0.00460	0.1046	0.0829
2	846480.5	0.00143	0.00540	0.1080	0.0034
3	819765.7	0.00139	0.00540	0.1080	0.0000

D akhir = 0.1080 m

ACC = Rp 46,436,155,785.5 /y

**SR 4 menuju SK 3**

Jarak = 230 km = 230,000 m

Waktu Operasi = 22 y

Laju alir = 0.501 Mt/y = 15.89 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	1779477.8	0.00080	0.00450	0.1812	0.0063
2	1841292.8	0.00083	0.00460	0.1820	0.0008
3	1833216.7	0.00082	0.00460	0.1820	0.0000

D akhir = 0.1820 m

ACC = Rp 51,417,881,020.0 /y

**SR 5 menuju SK 3**

Jarak = 129 km = 129,000 m

Waktu Operasi = 20 y

Laju alir = 0.3276 Mt/y = 10.39 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\epsilon/D$	$f$	D	Error
1	1163586.7	0.00080	0.00450	0.1362	0.0513
2	1601969.3	0.00110	0.00500	0.1391	0.0029
3	1568565.6	0.00108	0.00500	0.1391	0.0000

D akhir = 0.1391 m

ACC = Rp 23,943,498,409.2 /y

**SR 5 menuju SK 5**

Jarak = 567 km = 567,000 m

Waktu Operasi = 12 y

Laju alir = 0.2619 Mt/y = 8.30 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\varepsilon/D$	$f$	D	Error
1	930230.0	0.00080	0.00450	0.1674	0.0201
2	1041670.8	0.00090	0.00480	0.1696	0.0022
3	1028311.6	0.00088	0.00480	0.1696	0.0000

D akhir = 0.1696 m

ACC = Rp 158,846,990,249.5 /y

**SR 5 menuju SK 6**

Jarak = 559.4 km = 559,400 m

Waktu Operasi = 2 y

Laju alir = 1.5715 Mt/y = 49.83 kg/s

D awal = 0.1875 m

Iterasi	Re	$\varepsilon/D$	$f$	D	Error
1	5581735.2	0.00080	0.00450	0.3419	0.1544
2	3060623.6	0.00044	0.00410	0.3356	0.0063
3	3118140.4	0.00045	0.00410	0.3356	0.0000

D akhir = 0.3356 m

ACC = Rp 1,196,239,467,255.0 /y

**$\Sigma$  ACC perpipaan = Rp 1,671,199,830,036.6 /y**

**Perhitungan AOC perpipaian**

AOC perpipaian = O&M *cost factor* x jarak

**SR 1 menuju SK 2**

Jarak

= 74 km

AOC

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 74.0 \text{ km} \\ &\text{Rp } 3,049,184,800.0 \text{ /y} \end{aligned}$$

**SR 1 menuju SK 4**

Jarak

= 504 km

AOC

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 504.0 \text{ km} \\ &\text{Rp } 20,767,420,800.0 \text{ /y} \end{aligned}$$

**SR 2 menuju SK 3**

Jarak

= 136 km

AOC

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 136.0 \text{ km} \\ &\text{Rp } 5,603,907,200.0 \text{ /y} \end{aligned}$$

**SR 2 menuju SK 1**

Jarak

= 88 km

AOC

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 88.0 \text{ km} \\ &\text{Rp } 3,626,057,600.0 \text{ /y} \end{aligned}$$

**SR 3 menuju SK 3**

Jarak

= 205 km

AOC

$$= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 205.0 \text{ km} \\ \text{Rp } 8,447,066,000.0 \text{ /y}$$

### **SR 4 menuju SK 3**

Jarak

= 230 km

AOC

$$= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 230.0 \text{ km} \\ \text{Rp } 9,477,196,000.0 \text{ /y}$$

### **SR 4 menuju SK 3**

Jarak

= 230 km

AOC

$$= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 230.0 \text{ km} \\ \text{Rp } 9,477,196,000.0 \text{ /y}$$

### **SR 5 menuju SK 3**

Jarak

= 129 km

AOC

$$= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 129.0 \text{ km} \\ \text{Rp } 5,315,470,800.0 \text{ /y}$$

### **SR 5 menuju SK 5**

Jarak

= 567 km

AOC

$$= \text{Rp } 41,205,200.0 \text{ /km.y} \times 567.0 \text{ km} \\ \text{Rp } 23,363,348,400.0 \text{ /y}$$

### **SR 5 menuju SK 6**

Jarak

= 559.4 km

AOC

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 41,205,200.0 / \text{km.y} \quad \times \quad 559.4 \quad \text{km} \\ &\quad \text{Rp } 23,050,188,880.0 \quad / \text{y} \end{aligned}$$

**$\Sigma$  AOC perpipaan = Rp 112,177,036,480.0 /y**

### **Perhitungan ACC dan AOC perkapalan**

#### **Kondisi operasi pembanding :**

##### **Kapal :**

Kapasitas = 10,000 t/cycle

*Construction cost* = Rp 465,220,000,000.0

*CIM cost* = 5% *Construction cost*

*Fuel cost* = Rp 121,621,800.0 /d

##### *Intermediate Storage (IS) :*

Kapasitas = 20,000 t

*Construction cost* = Rp 398,760,000,000.0

*O&M cost* = 5% *Construction cost*

##### Fasilitas Bongkar Muat (BM) :

Kapasitas = 20,000 t

*Construction cost* = Rp 106,336,000,000.0

*O&M cost* = 25% *Construction cost*

*Interest* = 10,5 % (Mitsubishi Heavy Industries, 2004)

##### Kondisi operasi :

Total laju alir via perkapalan =

SR 1 menuju SK 4 + SR 5 menuju SK 5 + SR 5 menuju SK 6

$$= 0.1572 \quad \text{Mt/y} \quad + \quad 0.2619 \quad \text{Mt/y} \quad + \quad 1.5715 \quad \text{Mt/y}$$

$$= 1.9906 \quad \text{Mt/y}$$

$$= 5,453.7 \quad \text{t/d} \quad \quad \quad \text{*asumsi: 1 cycle = 2 d}$$

$$= 10,907.4 \quad \text{t/cycle}$$

Waktu operasi = 55 y

### Perhitungan ACC perkapalan

ACC A

$$= \text{construction cost B} \times \left( \frac{\text{kapasitas A}}{\text{kapasitas B}} \right)^{0,6} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

ACC Kapal :

$$= \text{Rp } 465,220,000,000.0 \times \left( \frac{10907,4}{10.000} \right)^{0,6} \times \frac{10,5\% [1+10,5\%]^{55}}{[1+10,5\%]^{55} - 1}$$

$$= \text{Rp } 51,674,237,674.1$$

ACC IS :

$$= \text{Rp } 398,760,000,000.0 \times \left( \frac{5453,7}{20,000} \right)^{0,6} \times \frac{10,5\% [1+10,5\%]^{55}}{[1+10,5\%]^{55} - 1}$$

$$= \text{Rp } 19,279,301,449.3$$

ACC BM :

$$= \text{Rp } 106,336,000,000.0 \times \left( \frac{5453,7}{20,000} \right)^{0,6} \times \frac{10,5\% [1+10,5\%]^{55}}{[1+10,5\%]^{55} - 1}$$

$$= \text{Rp } 5,141,147,053.2$$

$$\Sigma \text{ ACC perkapalan} = \text{Rp } 76,094,686,176.6 / y$$

### Perhitungan AOC perkapalan

AOC Kapal :

$$\text{AOC kapal} = \text{CIM cost kapal} + \frac{\text{fuel cost}}{[10,000] - 1} + \frac{10,907.4}{10,000} \times$$

$$\text{Rp } 121,621,800.0/d \times 365 d/y$$

$$= \text{Rp } 72,925,429,486.2 / y$$

AOC IS :

$$\text{AOC IS} = \text{O\&M cost IS}$$

$$= 5\% \times \text{Rp } 398,760,000,000.0 \times \left( \frac{5453,7}{20,000} \right)^{0,6}$$

$$= \text{Rp } 9,142,780,122.9 / y$$

AOC IS :



$$\begin{aligned}
 \text{AOC BM} &= \text{O\&M cost BM} \\
 &= 25\% \times \text{Rp } 106,336,000,000.0 \times \left( \frac{5453,7}{20,000} \right)^{0.6} \\
 &= \text{Rp } 12,190,373,497.1 / \text{y} \\
 \Sigma \text{ AOC perkapalan} &= \text{Rp } 94,258,583,106.2 / \text{y}
 \end{aligned}$$

### **Perhitungan AOC *penalty***

$$\text{Carbon tax} = \text{Rp } 280,000.0 / \text{t} \quad (\text{Sofyan, 2010})$$

### **Perhitungan AOC *penalty alternative storage***

$$\text{AOC } \textit{penalty alternative storage} = \text{carbon tax} \times \text{laju aliran massa } \textit{alternative storage}$$

Jumlah kebutuhan *alternative storage* (Mt/y) :

$$\begin{aligned}
 \text{SR 1} &= 1.4188 \\
 &= 0.1572 \\
 \text{SR 2} &= 0 \\
 \text{SR 3} &= 0.1330 \\
 \text{SR 4} &= 0 \\
 \text{SR 5} &= 0.3460 \\
 &= 0.2619 \\
 &= 1.5715 \\
 \text{Total} &= \underline{3.8884} + \\
 &= 3,888,400.0 \text{ t/y}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{AOC } \textit{penalty alternative storage} &= 3,888,400 \text{ t/y} \times \text{Rp } 280,000/\text{y} \\
 &= \text{Rp } 1,088,752,000,000.0 / \text{y}
 \end{aligned}$$

### **Perhitungan AOC *penalty unutilized storage***

$$\begin{aligned}
 \text{AOC } \textit{penalty unutilized storage} &= \\
 &\text{carbon tax} \times \text{laju aliran massa } \textit{unutilized storage} \\
 \text{Jumlah } \textit{unutilized storage} &(\text{Mt/y}) :
 \end{aligned}$$

SK 1	=	0.0000	
SK 2	=	0.0000	
SK 3	=	0.1330	
	=	0.1256	
SK 4	=	0.0000	
SK 5	=	0.0000	
SK 6	=	<u>0.0000</u>	+
Total	=	0.2586	Mt/y
	=	258,600	t/y

$$\begin{aligned} \text{AOC penalty } \textit{unutilized storage} &= \text{Rp } 258,600 \text{ t/y} \times \text{Rp } 280,000 / \text{t} \\ &= \text{Rp } 72,408,000,000.0 / \text{y} \end{aligned}$$

$$\Sigma \text{ AOC } \textit{penalty} = \text{Rp } 1,161,160,000,000.0 / \text{y}$$

**Perhitungan *Total Annual Capital Cost (TACC)* :**

$$\begin{aligned} \text{TACC} &= \Sigma \text{ACC perpipaan} + \Sigma \text{ACC perkapalan} \\ &= \text{Rp } 1,671,199,830,036.6 / \text{y} + \text{Rp } 76,094,686,176.6 / \text{y} \\ &= \text{Rp } 1,747,294,516,213.1 / \text{y} \end{aligned}$$

**Perhitungan *Total Annual Operating Cost (TAOC)* :**

$$\begin{aligned} \text{TAOC} &= \Sigma \text{AOC perpipaan} + \Sigma \text{AOC perkapalan} + \Sigma \text{AOC } \textit{penalty} \\ &= \text{Rp } 112,177,036,480.0 / \text{y} + \text{Rp } 94,258,583,106.2 / \text{y} + \text{Rp } \\ &\quad 1,161,160,000,000.0 \\ &= \text{Rp } 1,367,595,619,586.2 / \text{y} \end{aligned}$$

**Perhitungan TAC :**

$$\begin{aligned} \text{TAC} &= \text{TACC} + \text{TAOC} \\ &= \text{Rp } 1,747,294,516,213.1 / \text{y} + \text{Rp } 1,367,595,619,586.2 / \text{y} \\ &= \text{Rp } 3,114,890,135,799.3 / \text{y} \end{aligned}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

## LAMPIRAN

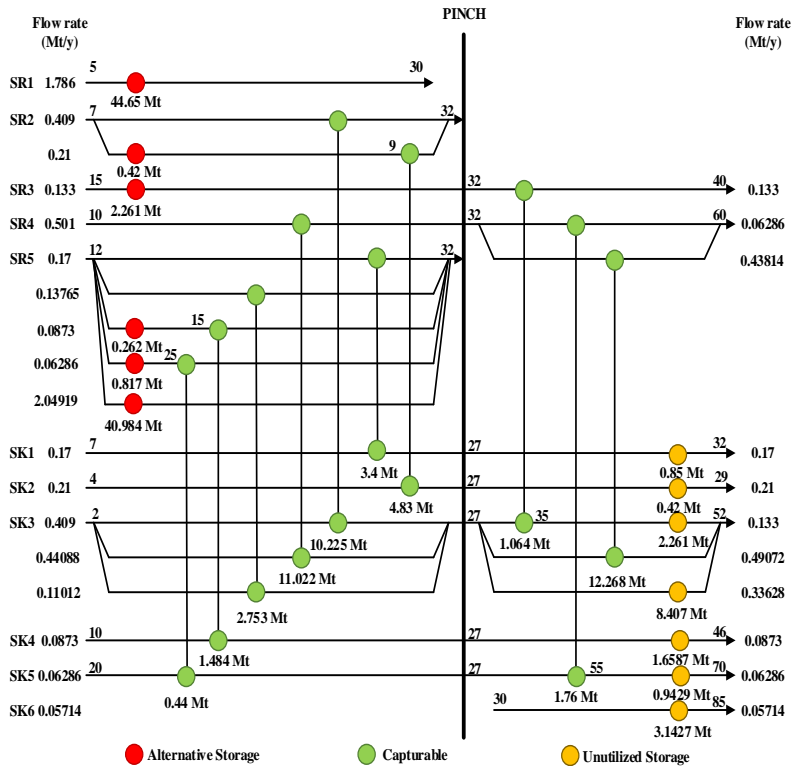
- Gambar metode *pinch single region* pada pengerjaan simultan  $\Delta t=5$  tahun (*table cascade*)

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	89.394
7	1.786		2	-1.786	-3.572	-3.572	85.822
9	SR2						
10	0.619		2	-1.445	-2.890	-6.462	82.932
12		SK3					
15		0.96	1	-1.235	-1.235	-7.697	81.697
17	SR4						
19	0.501	SK2					
21		0.21	2	-1.736	-3.472	-11.169	78.225
23	SR5						
25	2.507	SK1					
27		0.17	3	-4.073	-12.219	-23.388	66.006
29	SR3						
31	0.133	SK4					
33		0.0873	10	-4.119	-41.187	-64.575	24.819
35		SK5					
37		0.06286	5	-4.056	-20.279	-84.854	4.540
39			2	-2.270	-4.540	-89.394	0
41							
43			2	0.856	1.712	-87.682	1.712
45							
47			1	0.646	0.646	-87.035	2.358
49		SK6					
51		0.05714	2	0.703	1.407	-85.629	3.765
53							
55			3	0.533	1.600	-84.029	5.365
57							
59			11	0.666	7.329	-76.700	12.694
61							
63			6	0.579	3.474	-73.226	16.168
65							
67			3	-0.381	-1.143	-74.369	15.025
69							
71			15	0.120	1.800	-72.569	16.825
73							
75			15	0.057	0.857	-71.712	17.682
77							
79							
81							
83							
85							
87							
89							
91							
93							
95							
97							
99							

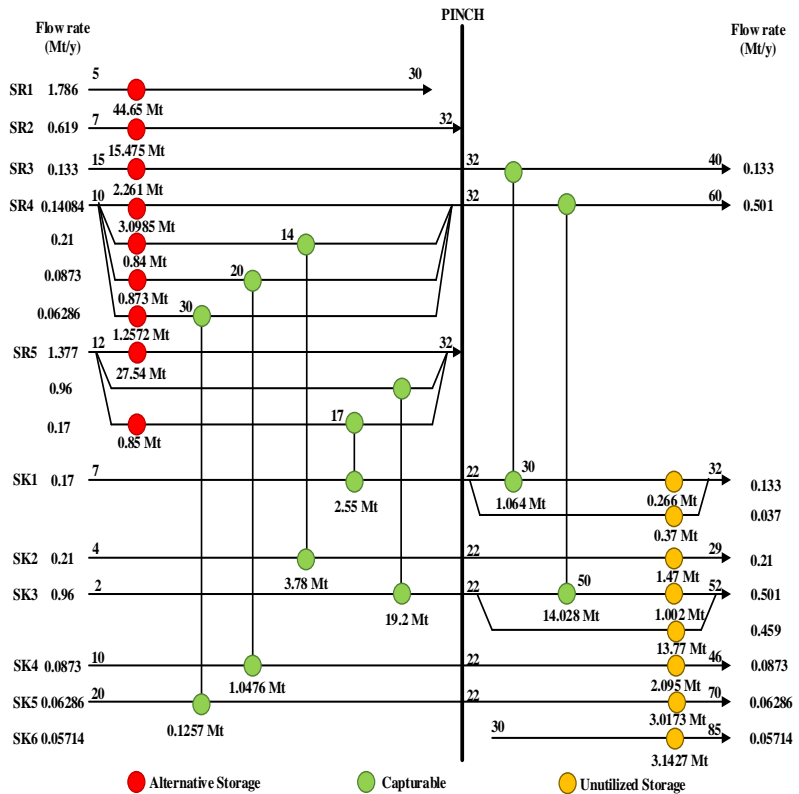
- Gambar metode *pinch single region* pada pengerjaan simultan  $\Delta t=10$  tahun (*table cascade*)

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	96.845
	1.786		2	-1.786	-3.572		
7	SR2					-3.572	93.273
	0.619		3	-2.405	-7.215		
10	SR4					-10.787	86.058
	0.501		2	-2.906	-5.812		
12	SR5	SK3				-16.599	80.246
	2.507	0.96	2	-4.453	-8.906		
14		SK2				-25.505	71.340
		0.21	1	-4.243	-4.243		
15	SR3					-29.748	67.097
	0.133		2	-4.376	-8.752		
17		SK1				-38.500	58.345
		0.17	3	-4.206	-12.618		
20		SK4				-51.118	45.727
		0.0873	10	-4.119	-41.187		
30		SK5				-92.305	4.540
		0.06286	2	-2.270	-4.540		
32						-96.845	0
			7	0.856	5.993		(PINCH)
39						-90.852	5.993
			1	0.646	0.646		
40		SK6				-90.205	6.639
		0.05714	2	0.836	1.673		
42						-88.533	8.312
			14	0.666	9.328		
56						-79.205	17.640
			4	0.579	2.316		
60						-76.889	19.956
			2	1.080	2.160		
62						-74.729	22.116
			18	0.120	2.160		
80						-72.569	24.276
			15	0.057	0.857		
95						-71.712	25.133

- Gambar metode *pinch* simultan pada  $\Delta t = 5$  tahun (*grid diagram*)



- Gambar metode *pinch* simultan pada  $\Delta t = 10$  tahun (*grid diagram*)



- Gambar metode *pinch single region* pada pengerjaan *sequential  $\Delta t=5$  tahun (table cascade)*

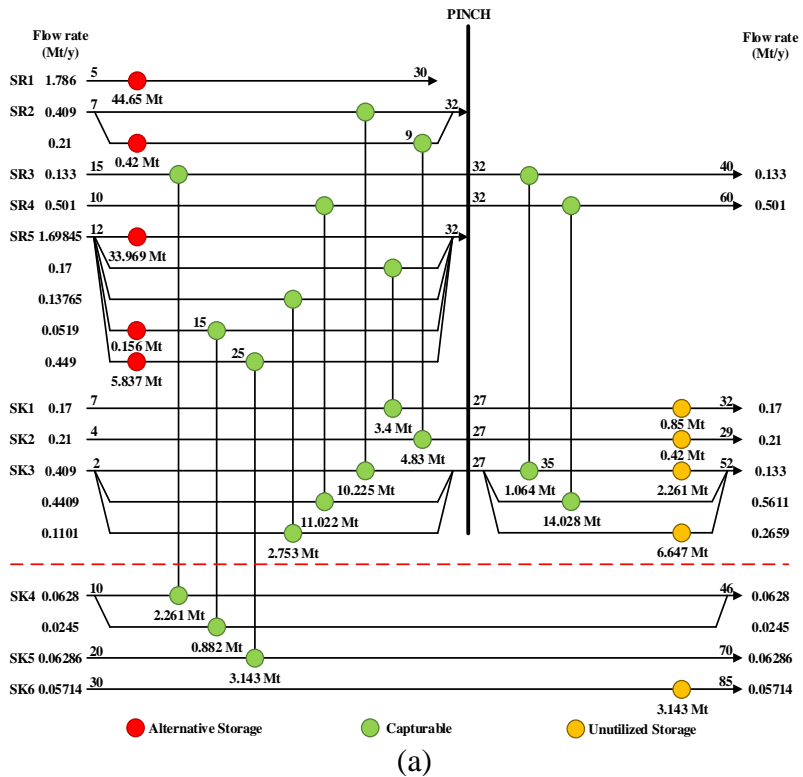
t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	91.318
	1.786		2	-1.786	-3.572		
7	SR2	SK3				-3.572	87.746
	0.619	0.960	2	-1.445	-2.89		
9		SK2				-6.462	84.856
		0.210	1	-1.235	-1.235		
10	SR4					-7.697	83.621
	0.501		2	-1.736	-3.472		
12		SR5				-11.169	80.149
		2.507	3	-4.073	-12.219		
15	SR3	SK1				-23.388	67.93
	0.133	0.170	15	-4.206	-63.09		
30						-86.478	4.84
			2	-2.42	-4.84		
32						-91.318	0
			2	0.706	1.412		(PINCH)
34						-89.906	1.412
			3	0.496	1.488		
37						-88.418	2.9
			3	0.326	0.978		
40						-87.44	3.878
			17	0.459	7.803		
57						-79.637	11.681
			3	-0.501	-1.503		
60						-81.14	10.178

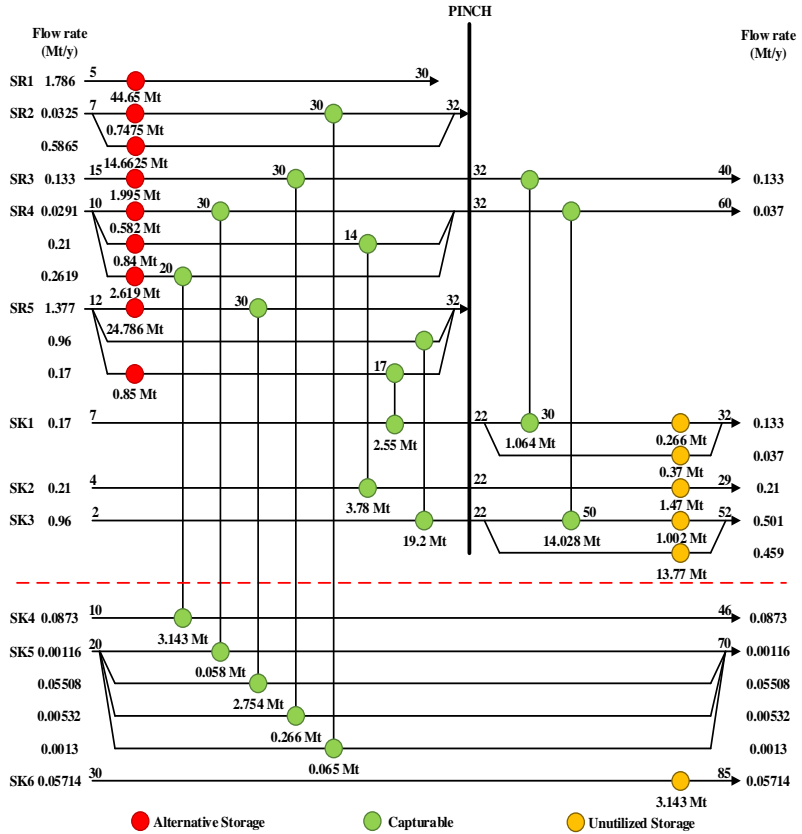


- Gambar metode *pinch single region* pada pengerjaan *sequential  $\Delta t = 10$  tahun (table cascade)*

t (year)	Source, $S_{i,t}$ (Mt/y)	Sink, $D_{j,t}$ (Mt/y)	$\Delta t$	Flowrate CO <sub>2</sub> (Mt/y)	Load CO <sub>2</sub> (Mt)	CO <sub>2</sub> cascade (Mt)	
						Infeasible	Feasible
5	SR1					0	98.018
	1.786		2	-1.786	-3.572		
7	SR2					-3.572	94.446
	0.619		3	-2.405	-7.215		
10	SR4					-10.787	87.231
	0.501		2	-2.906	-5.812		
12	SR5	SK3				-16.599	81.419
	2.507	0.960	2	-4.453	-8.906		
14		SK2				-25.505	72.513
		0.210	1	-4.243	-4.243		
15	SR3					-29.748	68.27
	0.133		2	-4.376	-8.752		
17		SK1				-38.5	59.518
		0.170	13	-4.206	-54.678		
30						-93.178	4.84
			2	-2.420	-4.84		
32						-98.018	0
			7	0.706	4.942	(PINCH)	
39						-93.076	4.942
			1	0.496	0.496		
40						-92.58	5.438
			2	0.629	1.258		
42						-91.322	6.696
			18	0.459	8.262		
60						-83.06	14.958
			2	0.960	1.92		
62						-81.14	16.878

- Gambar metode *pinch* pada pengerjaan *sequential* pada  $\Delta t = 5$  tahun (a) dan 10 tahun (b) (*diagram grid*)





(b)

- Input GAMS *cascade tabel* simultan pada  $\Delta t = 5$  tahun dan 10 tahun.

a.  $\Delta t = 5$  tahun

### GAMS Program

```
VARIABLES
AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16,
Z;
POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, AltStrg, UntStrg;
EQUATIONS
OBJ      define objective function
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13,
T14, T15, T16, T17;
OBJ.. Z =E= AltStrg;
T1.. AltStrg - R1 - 3.572 =E= 0;
T2.. R1 - R2 - 2.890 =E= 0;
T3.. R2 - R3 - 1.235 =E= 0;
T4.. R3 - R4 - 3.472 =E= 0;
T5.. R4 - R5 - 12.219 =E= 0;
T6.. R5 - R6 - 41.187 =E= 0;
T7.. R6 - R7 - 20.279 =E= 0;
T8.. R7 - R8 - 4.540 =E= 0;
T9.. R8 - R9 + 1.712 =E= 0;
T10.. R9 - R10 + 0.646 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 1.407 =E= 0;
T12.. R11 - R12 + 1.6 =E= 0;
T13.. R12 - R13 + 7.329 =E= 0;
T14.. R13 - R14 + 3.474 =E= 0;
T15.. R14 - R15 - 1.143 =E= 0;
T16.. R15 - R16 + 1.8 =E= 0;
T17.. R16 - UntStrg + 0.857 =E= 0;

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;
DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, R12.L, R13.L, R14.L, R15.L, R16.L,
AltStrg.L, UntStrg.L;
```

### GAMS Solution

```
**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS       1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    89.3940
```

VARIABLE R1.L	=	85.822
VARIABLE R2.L	=	82.932
VARIABLE R3.L	=	81.697

VARIABLE R4.L	=	78.225
VARIABLE R5.L	=	66.006
VARIABLE R6.L	=	24.819
VARIABLE R7.L	=	4.540
VARIABLE R8.L	=	0.000
VARIABLE R9.L	=	1.712
VARIABLE R10.L	=	2.358
VARIABLE R11.L	=	3.765
VARIABLE R12.L	=	5.365
VARIABLE R13.L	=	12.694
VARIABLE R14.L	=	16.168
VARIABLE R15.L	=	15.025
VARIABLE R16.L	=	16.825
VARIABLE AltStrg.L	=	89.394
VARIABLE UntStrg.L	=	17.682

b.  $\Delta t = 10$  tahun

### **GAMS Program**

```

VARIABLES
AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16,
Z;
POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, AltStrg, UntStrg;
EQUATIONS
OBJ      define objective function
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13,
T14, T15, T16, T17;
OBJ.. Z =E= AltStrg;
T1.. AltStrg - R1 - 3.572 =E= 0;
T2.. R1 - R2 - 7.215 =E= 0;
T3.. R2 - R3 - 5.812 =E= 0;
T4.. R3 - R4 - 8.906 =E= 0;
T5.. R4 - R5 - 4.243 =E= 0;
T6.. R5 - R6 - 8.752 =E= 0;
T7.. R6 - R7 - 12.618 =E= 0;
T8.. R7 - R8 - 41.187 =E= 0;
T9.. R8 - R9 - 4.540 =E= 0;
T10.. R9 - R10 + 5.993 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 0.646 =E= 0;
T12.. R11 - R12 + 1.673 =E= 0;
T13.. R12 - R13 + 9.328 =E= 0;
T14.. R13 - R14 + 2.316 =E= 0;
T15.. R14 - R15 + 2.160 =E= 0;
T16.. R15 - R16 + 2.160 =E= 0;
T17.. R16 - UntStrg + 0.857 =E= 0;

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;

```

```

DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, R12.L, R13.L, R14.L, R15.L, R16.L,
AltStrg.L, UntStrg.L;

```

### GAMS Solution

```

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    96.8450

```

VARIABLE R1.L	=	93.273
VARIABLE R2.L	=	86.058
VARIABLE R3.L	=	80.246
VARIABLE R4.L	=	71.340
VARIABLE R5.L	=	67.097
VARIABLE R6.L	=	58.345
VARIABLE R7.L	=	45.727
VARIABLE R8.L	=	4.540
VARIABLE R9.L	=	0.000
VARIABLE R10.L	=	5.993
VARIABLE R11.L	=	6.639
VARIABLE R12.L	=	8.312
VARIABLE R13.L	=	17.640
VARIABLE R14.L	=	19.956
VARIABLE R15.L	=	22.116
VARIABLE R16.L	=	24.276
VARIABLE AltStrg.L	=	96.845
VARIABLE UntStrg.L	=	25.133

- Input GAMS *cascade tabel single region* pada  $\Delta t = 5$  tahun dan 10 tahun.
- a.  $\Delta t = 5$  tahun

### GAMS Program

```

VARIABLES
AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11
Z;
POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, AltStrg, UntStrg;
EQUATIONS
OBJ      define objective function
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12;
OBJ.. Z =E= AltStrg;
T1.. AltStrg - R1 - 3.572 =E= 0;
T2.. R1 - R2 - 2.89 =E= 0;
T3.. R2 - R3 - 1.235 =E= 0;
T4.. R3 - R4 - 3.472 =E= 0;
T5.. R4 - R5 - 12.219 =E= 0;

```

```

T6.. R5 - R6 - 63.09 =E= 0;
T7.. R6 - R7 - 4.84 =E= 0;
T8.. R7 - R8 + 1.412 =E= 0;
T9.. R8 - R9 + 1.488 =E= 0;
T10.. R9 - R10 + 0.978 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 7.803 =E= 0;
T12.. R11 - UntStrg - 1.503 =E= 0;

```

```

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;
DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, AltStrg.L, UntStrg.L;

```

### GAMS Solution

```

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE   91.3180

```

VARIABLE R1.L	=	87.746
VARIABLE R2.L	=	84.856
VARIABLE R3.L	=	83.621
VARIABLE R4.L	=	80.149
VARIABLE R5.L	=	67.930
VARIABLE R6.L	=	4.840
VARIABLE R7.L	=	0.000
VARIABLE R8.L	=	1.412
VARIABLE R9.L	=	2.900
VARIABLE R10.L	=	3.878
VARIABLE R11.L	=	11.681
VARIABLE AltStrg.L	=	91.318
VARIABLE UntStrg.L	=	10.178

b.  $\Delta t = 5$  tahun

### GAMS Program

```

VARIABLES
AltStrg, UntStrg, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12
Z;
POSITIVE VARIABLE R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9,
R10, R11, R12, AltStrg, UntStrg;
EQUATIONS
OBJ      define objective function
T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13;
OBJ.. Z =E= AltStrg;
T1.. AltStrg - R1 - 3.572 =E= 0;
T2.. R1 - R2 - 7.215 =E= 0;
T3.. R2 - R3 - 5.812 =E= 0;
T4.. R3 - R4 - 8.906 =E= 0;

```

```

T5.. R4 - R5 - 4.243 =E= 0;
T6.. R5 - R6 - 8.752 =E= 0;
T7.. R6 - R7 - 54.678 =E= 0;
T8.. R7 - R8 - 4.84 =E= 0;
T9.. R8 - R9 + 4.942 =E= 0;
T10.. R9 - R10 + 0.496 =E= 0;
T11.. R10 - R11 + 1.258 =E= 0;
T12.. R11 - R12 + 8.262 =E= 0;
T13.. R12 - UntStrg + 1.92 =E= 0;

MODEL HEAT/ALL/;
SOLVE HEAT USING LP MINIMIZING Z;
DISPLAY R1.L, R2.L, R3.L, R4.L, R5.L, R6.L, R7.L, R8.L,
R9.L, R10.L, R11.L, R12.L, AltStrg.L, UntStrg.L;

```

### GAMS Solution

```

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS       1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    98.0180

```

VARIABLE R1.L	=	94.446
VARIABLE R2.L	=	87.231
VARIABLE R3.L	=	81.419
VARIABLE R4.L	=	72.513
VARIABLE R5.L	=	68.270
VARIABLE R6.L	=	59.518
VARIABLE R7.L	=	4.840
VARIABLE R8.L	=	0.000
VARIABLE R9.L	=	4.942
VARIABLE R10.L	=	5.438
VARIABLE R11.L	=	6.696
VARIABLE R12.L	=	14.958
VARIABLE AltStrg.L	=	98.018
VARIABLE UntStrg.L	=	16.878

- Input Matlab TAC diagram grid simultan  
`clc;`  
`disp('Total Annualized Cost');`  
`disp('Diagram Grid Simultan')`  
`disp('_');`  
`disp('Delta Time 0 Tahun');`  
`'Piping cost';`  
`ppccf=10983692440.9449;`  
`ppocf=41205200;`  
`itr=0.105;`



```

'ACC';
'sr1-sk2';
D=0.10618286209212500;
L1=74;
top=25;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk3';
D=0.15749751911649900;
L2=136;
top=25;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk1';
D=0.10101746560531700;
L3=88;
top=25;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.1827881581343100;
L4=230;
top=22;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk3';
D=0.13909045497035400;
L5=129;
top=20;
cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk4';
D=0.11645779335476300;
L6=594;
top=20;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk5';
D=0.098488773223333900;
L7=567;
top=12;

```

```

cc7=D*L7*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk6';
D=0.094886847896720900;
L8=559.4;
top=2;
cc8=D*L8*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk3';
D=0.10764514078120900;
L9=205;
top=8;
cc9=D*L9*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk6';
D=0.090883952414594600;
L10=435.4;
top=28;
cc10=D*L10*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk5';
D=0.094084033716395600;
L11=443;
top=28;
cc11=D*L11*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.16451732238786500;
L12=230;
top=28;
cc12=D*L12*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7+cc8+cc9+cc10+cc11+cc12;
'AOC';
tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9+L10+L11+L12;
aocpp=tlpp*ppocf;
'Shipping cost';
kcapr=10000;
kconr=465220000000;
cim=0.05;

```

```

fuelcd=121621800;
iscapr=20000;
isconr=398760000000;
isom=0.05;
bmcapr=20000;
bmconr=106336000000;
bmom=0.25;
trated=920.630136986302;
tratec=1841.2602739726;
top=55;
itr=0.105;
acck=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accis=isconr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)
^top-1));
accship=acck+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd
*365);
aocis=isom*isconr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'Penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=3.79237;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=0.6339;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc0=accpp+accship;
taoc0=aocpp+aocship+aocp;
tac0=tacc0+taoc0;

```

```

disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc0)]);
disp(['Total Annualized Operating Cost = ',num2str(taoc0)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac0)]);
disp('_');

```

```

disp('Delta Time 5 Tahun');
disp('Piping cost');
ppccf=10983692440.9449;
ppocf=41205200;
itr=0.105;
'ACC';
'sr2-sk3';
D=0.15236779403036400;
L1=136;
top=25;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk2';
D=0.12326307650488900;
L2=165;
top=23;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L3=230;
top=22;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk1';
D=0.099600771967046700;
L4=82;
top=20;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk3';
D=0.10021870666292400;
L5=129;
top=20;

```

```

cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk4';
D=0.11252939603887500;
L6=594;
top=17;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk5';
D=0.099194858248434600;
L7=567;
top=7;
cc7=D*L7*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk3';
D=0.10804831739265200;
L8=205;
top=8;
cc8=D*L8*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk5';
D=0.094417673417871600;
L9=443;
top=28;
cc9=D*L9*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.17250040643259500;
L10=230;
top=28;
cc10=D*L10*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7+cc8+cc9+cc10;
'AOC';
tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9+L10;
aocpp=tlpp*ppocf;
'Shipping cost';
kcapr=10000;
kconr=465220000000;
cim=0.05;
fuelcd=121621800;

```

```

iscapr=20000;
isconr=398760000000;
isom=0.05;
bmcapr=20000;
bmconr=106336000000;
bmom=0.25;
trated=583.6164383561650;
tratec=1167.232876712330;
top=53;
itr=0.105;
ack=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accis=isconr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)
^top-1));
accship=ack+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd
*365);
aocis=isom*isconr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'Penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=4.32835;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=1.05658;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc5=accpp+accship;
taoc5=aocpp+aocship+aocp;
tac5=tacc5+taoc5;
disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc5)]);

```

```

disp(['Total Annualized Operating Cost = ',num2str(taoc5)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac5)]);
disp('_');

```

```

disp('Delta Time 10 Tahun');
'Piping cost';
ppccf=10983692440.9449;
ppocf=41205200;
itr=0.105;
'ACC';
'sr4-sk2';
D=0.11752354541364400;
L1=130;
top=18;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk4';
D=0.10778339240741500;
L2=470;
top=12;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk5';
D=0.094084033716395600;
L3=443;
top=2;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk3';
D=0.20843219309144400;
L4=129;
top=20;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk1';
D=0.099600771967046700;
L5=82;
top=15;
cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));

```

```

'sr3-sk1';
D=0.097431024907471600;
L6=120;
top=8;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L7=230;
top=28;
cc7=D*L7*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7;
'AOC';
tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7;
aocpp=tlpp*ppocf;
'Shipping cost';
kcapr=10000;
kconr=465220000000;
cim=0.05;
fuelcd=121621800;
iscapr=20000;
isconr=398760000000;
isom=0.05;
bmcapr=20000;
bmconr=106336000000;
bmom=0.25;
trated=411.39726027397300;
tratec=822.79452054794500;
top=48;
itr=0.105;
acck=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accis=isconr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));

```



```

accship=acck+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd
*365);
aocis=isom*isconr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=4.586000;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=1.5473000;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc10=accpp+accship;
taoc10=aocpp+aocship+aocp;
tac10=tacc10+taoc10;
disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc10)]);
disp(['Total Annualized Operating Cost =
',num2str(taoc10)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac10)]);
disp('_');

y1=[tacc0,tacc5,tacc10];
y2=[taoc0,taoc5,taoc10];
y3=[tac0,tac5,tac10];
x=[0,5,10];
plot (x,y1,'sred-',x,y2,'sblue-',x,y3,'sblack-')
ylabel('Rp(triliyun)/tahun')
xlabel('dT')

```

- Input Matlab TAC diagram grid sequential  
 clc;  
 disp('Total Annualized Cost');

```

disp('Diagram Grid Sequencial')
disp('_');
disp('Delta Time 0 Tahun');
ppccf=10983692440.9449;
ppocf=41205200;
itr=0.105;
'ACC';
'sr1-sk2';
D=0.105793903422169;
L1=74;
top=25;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr1-sk4';
D=0.13671903575334400;
L2=504;
top=20;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk3';
D=0.15816208922476900;
L3=136;
top=25;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk1';
D=0.10101746560531700;
L4=88;
top=25;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk3';
D=0.10804831739265200;
L5=205;
top=8;
cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L6=230;

```

```

top=22;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L7=230;
top=28;
cc7=D*L7*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk3';
D=0.13909045497035400;
L8=129;
top=20;
cc8=D*L8*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk5';
D=0.16961602695471200;
L9=567;
top=12;
cc9=D*L9*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk6';
D=0.33564087565295600;
L10=559.4;
top=2;
cc10=D*L10*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7+cc8+cc9+cc10;
'AOC';
tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9+L10;
aocpp=tlpp*ppocf;
'Shipping cost';
kcapr=10000;
kconr=465220000000;
cim=0.05;
fuelcd=121621800;
iscapr=20000;
isconr=398760000000;
isom=0.05;
bmcapr=20000;

```

```

bmconr=106336000000;
bmom=0.25;
trated=5453.69863013699;
tratec=10907.397260274;
top=55;
itr=0.105;
acck=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accis=isconr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)
^top-1));
accship=acck+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd
*365);
aocis=isom*isconr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'Penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=3.8884;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=0.2586;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc0=accpp+accship;
taoc0=aocpp+aocship+aocp;
tac0=tacc0+taoc0;
disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc0)]);
disp(['Total Annualized Operating Cost = ',num2str(taoc0)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac0)]);
disp('_');

```

```

disp('Delta Time 5 Tahun');
ppccf=10983692440.9449;
ppocf=41205200;
itr=0.105;
'ACC';
'sr2-sk3';
D=0.15236779403036400;
L1=136;
top=25;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr2-sk2';
D=0.12373355994468400;
L2=165;
top=23;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk4';
D=0.13301739883592100;
L3=602;
top=17;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk3';
D=0.10804831739265200;
L4=205;
top=8;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L5=230;
top=22;
cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.18200363063661100;
L6=230;
top=28;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));

```

```

'sr5-sk1';
D=0.099960350896947200;
L7=82;
top=20;
cc7=D*L7*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk3';
D=0.10058051646204600;
L8=129;
top=20;
cc8=D*L8*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk4';
D=0.093058845090528900;
L9=594;
top=17;
cc9=D*L9*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr5-sk5';
D=0.2068014173926300;
L10=567;
top=7;
cc10=D*L10*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7+cc8+cc9+cc10;
'AOC';
tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9+L10;
aocpp=tlpp*ppocf;
'Shipping cost';
kcapr=10000;
kconr=465220000000;
cim=0.05;
fuelcd=121621800;
iscapr=20000;
isconr=398760000000;
isom=0.05;
bmcapr=20000;
bmconr=106336000000;
bmom=0.25;

```

```

trated=1736.71232876712;
tratec=3473.42465753425;
top=53;
itr=0.105;
ack=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accis=isconr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
accship=ack+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd*365);
aocis=isom*isconr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'Penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=4.19535;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=0.83604;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc5=accpp+accship;
taoc5=aocpp+aocship+aocp;
tac5=tacc5+taoc5;
disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc5)]);
disp(['Total Annualized Operating Cost = ',num2str(taoc5)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac5)]);
disp('_');

disp('Delta Time 10 Tahun');
'Piping cost';

```

```

ppccf=10983692440.9449;
ppocf=41205200;
itr=0.105;
'ACC';
'sr2-sk5';
D=0.07752695142425300;
L1=578;
top=2;
cc1=D*L1*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk5';
D=0.13154777253664900;
L2=575;
top=2;
cc2=D*L2*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr3-sk1';
D=0.097431024907471600;
L3=120;
top=8;
cc3=D*L3*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk5';
D=0.070787060512400600;
L4=443;
top=2;
cc4=D*L4*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk3';
D=0.068132201518895800;
L5=230;
top=28;
cc5=D*L5*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk2';
D=0.11752354541364400;
L6=130;
top=18;
cc6=D*L6*ppccf*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));
'sr4-sk4';

```



D=0.1633690734666100;  
 L7=470;  
 top=12;  
 cc7=D\*L7\*ppccf\*(itr\*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));  
 'sr5-sk5';  
 D=0.31922344990505700;  
 L8=567;  
 top=2;  
 cc8=D\*L8\*ppccf\*(itr\*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));  
 'sr5-sk3';  
 D=0.20843219309144400;  
 L9=129;  
 top=20;  
 cc9=D\*L9\*ppccf\*(itr\*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));  
 'sr5-sk1';  
 D=0.099960350896947200;  
 L10=82;  
 top=15;  
 cc10=D\*L10\*ppccf\*(itr\*(1+itr)^top/((1+itr)^top-1));  
 accpp=cc1+cc2+cc3+cc4+cc5+cc6+cc7+cc8+cc9+cc10;  
 'AOC';  
 tlpp=L1+L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9+L10;  
 aocpp=tlpp\*ppocf;  
 'Shipping cost';  
 kcapr=10000;  
 kconr=465220000000;  
 cim=0.05;  
 fuelcd=121621800;  
 iscapr=20000;  
 isconr=398760000000;  
 isom=0.05;  
 bmcapr=20000;  
 bmconr=106336000000;  
 bmom=0.25;  
 trated=5023.28767123288;

```

tratec=10046.5753424658;
top=48;
itr=0.105;
ack=kconr*((tratec/kcapr)^0.6)*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accis=iskonr*(trated/iscapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)^top
-1));
accbm=bmconr*(trated/bmcapr)^0.6*(itr*(1+itr)^top/((1+itr)
^top-1));
accship=ack+accis+accbm;
aock=(cim*kconr*(tratec/kcapr)^0.6)+((tratec/kcapr)*fuelcd
*365);
aocis=isom*iskonr*(trated/iscapr)^0.6;
aocbm=bmom*bmconr*(trated/bmcapr)^0.6;
aocship=aock+aocis+aocbm;
'Penalty cost';
ptax=280000;
taltstg=4.586;
taltstg=taltstg*1000000;
aocaltstg=taltstg*ptax;
tutlstg=1.39714;
tutlstg=tutlstg*1000000;
aocutlstg=tutlstg*ptax;
aocp=aocaltstg+aocutlstg;
tacc10=accpp+accship;
taoc10=aocpp+aocship+aocp;
tac10=tacc10+taoc10;
disp(['Total Annualized Capital Cost = ',num2str(tacc10)]);
disp(['Total Annualized Operating Cost =
',num2str(taoc10)]);
disp(['Total Annualized Cost = ',num2str(tac10)]);
disp('_');

y1=[tacc0,tacc5,tacc10];
y2=[taoc0,taoc5,taoc10];

```

```
y3=[tac0,tac5,tac10];  
x=[0,5,10];  
plot (x,y1,'sred-',x,y2,'sblue-',x,y3,'sblack-')  
ylabel('Rp(triliyun)/tahun')  
xlabel('dT')
```

## BIODATA PENULIS



### Penulis 1 :

Penulis bernama Tabroni Ali Bustomi yang biasa dipanggil Tabroni, lahir di Lamongan pada tanggal 4 Januari 1995. Memulai pendidikan formal di MI Islamiyah Suci tahun 2000 - 2006, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 1 Sugio 2006-2009 dan melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 2 Lamongan pada tahun 2009-2012. Setelah lulus dari pendidikan SMA pada tahun 2012, penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke tingkat Diploma di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di bidang Teknik Kimia dan lulus pada tahun 2015 dan melanjutkan ke jenjang S1 pada bidang yang sama. Di Jurusan teknik kimia, penulis mengambil laboratorium Perancangan dan Pengendalian Proses.

Selain aktif dibidang akademis, penulis juga aktif di bidang organisasi mahasiswa jurusan dan lembaga dakwah jurusan. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Keprofesian dan keilmiahan Himad3kkim tahun 2013-2015, Kadep Kaderisasi LDJ dan Ketua Panitia BPT 2014.

Selain itu, penulis merupakan asisten Laboratorium OTK II pada tahun 2015 dan Laboratorium Teknologi Pengolahan Limbah D3 Teknik Kimia pada tahun 2016. Selama menempuh pendidikan di Teknik Kimia ITS, penulis juga pernah mengikuti kerja praktek di PT Indocement dan Pabrik Gula Kebon Agung. Selain itu, penulis menulis tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul “Pabrik LNG dari Gas Alam”. Dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmatNya dan karuniaNya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “*Teknologi Carbon Capture and Storage (CCS) System dengan Menggunakan Metode Pinch*”.

Salam hangat,  
Tabroni Ali Bustomi  
0821 4142 4462  
tabroni.ali73@gmail.com



## Penulis 2:

Penulis bernama Prayogo Kuntoro yang biasa dipanggil Yogo, lahir di Jakarta pada tanggal 11 Juli 1993. Memulai pendidikan formal di TK Angkasa 1 tahun 1998-1999, kemudian melanjutkan pendidikannya di SDN Kebon Pala 02 1999-2005. Selanjutnya menempuh pendidikan tingkat menengah di SMPN 80 Jakarta pada tahun 2005-2008 dan melanjutkan pendidikan di SMA Angkasa 1 Jakarta pada tahun 2008-2011. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke tahap diploma di jurusan Analisis Kimia, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2011-2014. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan ke tahap sarjana di jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis memilih laboratorium penelitian di bidang Perancangan dan Pengendalian Proses yang sesuai dengan bakat dan minat.

Selain aktif dibidang akademis, penulis juga aktif di bidang organisasi khususnya bidang olahraga. Penulis pernah menjadi staff olahraga di organisasi mahasiswa analisis kimia IPB pada tahun 2013-2014.

Selain itu, penulis juga memiliki beberapa pengalaman bekerja sebagai *Analyst (Chemical)* di PT. Dexa Medica, kerja praktek sebagai Asisten Analis di Pusat Studi Biofarmaka Bogor dan sebagai *Engineer* di PG Kebon Agung Malang. Selain itu, penulis menulis tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul “Pabrik LNG dari Gas Alam”. Dengan mengucapkan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmatNya dan karuniaNya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Teknologi *Carbon Capture and Storage (CCS) System* dengan Menggunakan Metode *Pinch*”.

Salam dahsyat,  
Prayogo Kuntoro  
0857 7260 8132  
prayogo1107@gmail.com